

ISSN 1342-0852
KURRI - KR - 161

複合原子力科学研究推進小委員会
平成22年度 活動報告書

複合原子力科学研究推進小委員会

京都大学原子炉実験所

Research Reactor Institute, Kyoto University

はじめに

平成 22 年 2 月に、「原子炉実験所における複合原子力科学研究を推進するため、中長期的観点からの行動計画を立案する。」ことを目的として、原子炉実験所・研究計画委員会の下に複合原子力科学推進小委員会が設置された。

その後、同年 3 月、日本学術会議より「提言 学術の大型施設計画・大規模研究計画 ー 企画・推進策の在り方とマスタープランの作成についてー」が公表された。これは、日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会の審議結果を取りまとめたものであり、「日本学術会議は学術の推進上の重大な問題点を認識し、科学者コミュニティの専門的意見を集約して、大型施設計画および大規模研究計画の検討を行い、わが国として初めての全分野にわたる大型計画のマスタープランを策定した」ものである。この提言のなかで、今後の特に重要な大型施設計画・大規模研究計画として、全学術分野から 43 課題が選定されている。

そのなかに、京都大学原子炉実験所からの提案「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」が、「原子力」を表看板として掲げた唯一のものとして「物理化学・工学」分野の大規模研究計画に選定された。この提案が目指すものは、「人類社会の持続的発展には原子力・放射線の利用が必要である。本計画では、研究炉・加速器を用いる共同利用・共同研究を軸に、複合的な原子力科学の発展と有効利用に向けた先導的研究を推進し、その拠点形成する。」ことであり、研究炉・加速器を利用して広義の原子力を推進しようというものである。

また、科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会が、同年 9 月に「学術研究の大型プロジェクトの推進について（審議のまとめ）ー学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想「ロードマップ」の策定ー」を公表した。これは、日本学術会議のマスタープランに盛り込まれた 43 計画についてさらに検討を深め、大型プロジェクト推進に当たっての優先度を明らかにする観点から、各研究計画についての評価結果を整理したものである。この中でも、京大炉の提案は、緊急度等の高い優先すべき 8 課題のうちに選定された。

これらの状況の下、原子炉実験所の将来計画の実現のために、精力的な検討と議論を行ってきた。本報告書は、この 1 年間の本小委員会の活動を報告するものである。

平成 22 年 2 月

京都大学原子炉実験所・研究計画委員会
複合原子力研究推進小委員会

川端祐司

複合原子力科学研究推進小委員会・平成22年度活動報告

目次

1. 複合原子力科学及び複合原子力科学推進検討小委員会とは (川端)	1
2. 大規模研究計画「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」(川端)	2
3. KUR 利用活性化検討	
3. 1 KUR 利用活性化について (杉山)	4
3. 2 医療照射設備改造案 (桜井)	7
3. 3 BNCT世界先端拠点構築計画 (小野)	13
3. 4 高度照射設備計画 (B 1 及びB 2 実験孔改造計画) (高宮)	18
4. ADS 研究の現状と今後の研究計画 (三沢)	20
5. FFAG の現状と今後の開発見通し (石)	29
6. 新加速器中性子源の提案	
6. 1 位置づけ (川端)	42
6. 2 加速器の構成 (石・谷垣)	43
6. 3 パルス中性子ターゲット (日野)	57
6. 4 パルス中性子用 CNS (安部)	61
6. 5 中性子照射用ターゲット (田中)	66
6. 6 建屋計画 (高宮・谷垣)	72
7. 新加速器中性子源を用いた研究提案	
7. 1 パルス中性子利用	
7. 1. 1 加速器パルス中性子利用の特徴 (杉山)	90
7. 1. 2 中性子小角散乱 (杉山)	91
7. 1. 3 反射率 (日野)	93
7. 1. 4 粉末結晶 (森)	95
7. 1. 5 断面積測定 (堀)	99
7. 1. 6 中性子イメージング (川端)	102
7. 2 中性子照射利用	
7. 2. 1 加速器中性子照射利用の特長 (瀬戸)	103
7. 2. 2 メスバウアー (瀬戸)	105
7. 2. 3 アクチニド・FP 利用 (藤井)	109
7. 2. 4 RI 製造・利用 (高宮)	111
7. 2. 5 材料照射 (徐)	114
7. 2. 6 ISOL (谷口)	117
7. 2. 7 BNCT 及び関連照射 (田中)	121
7. 2. 8 生物照射 (齊藤)	122
8. まとめ (川端)	125

添付 複合原子力研究推進小委員会名簿

1. 複合原子力科学及び複合原子力科学推進検討小委員会とは（川端）

「複合原子力科学」とは、京都大学原子炉実験所における研究の特長を表現するために新たに作られた造語である。

原子炉実験所においては、研究用原子炉(KUR)、ホットラボラトリ、臨界集合体(KUCA)、陽子加速器(FFAG, BNCT用サイクロトロン)、電子線線形加速器、 γ 線照射装置等のさまざまな大型装置を利用し、放射線・RIを用いた極めて範囲の広い、広義の原子力研究が全国共同利用システムの下に行われてきている。これらによって全国の研究者が自らの発想に基づいた研究を自由に行うための場を提供してきており、幅広い学術分野を基盤から支えるという役割を果たしてきた。その結果、エネルギー研究における加速器駆動未臨界システム(ADS)研究や放射線利用研究におけるBNCT研究の様に、大きな成果を挙げる研究が現れるようになってきている。

これらの研究には原子炉実験所ならではの長を有している。それは、単一の研究分野では実現不可能であり、多くの異分野の研究者が高いレベルで共同研究を実施した結果生まれたものである。例えば、BNCT研究においては、医学・薬学・中性子科学・ビーム科学・加速器学・研究炉管理等のどれが欠けても遂行することができないものであり、まさしく原子炉実験所のような幅広い分野の研究者が日常的に交流する場があってこそ生まれたものである。

この様な、幅広い研究分野の高次な交流によって生み出される複合分野を、ここでは複合原子力科学と言っている。

複合原子力科学推進検討小委員会とは、平成22年2月に「原子炉実験所における複合原子力科学研究を推進するため、中長期的観点からの行動計画を立案する。具体的には、大規模研究課題「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」の裏付けとなる根拠を作成する。」ことを目的として、原子炉実験所・研究計画委員会の下に設置されたものである。

小委員会の下に、1) ADSR 研究検討ワーキンググループ、2) 加速器中性子源検討ワーキンググループ、3) KUR 利用活性化検討ワーキンググループのサブグループを設け、それぞれに検討活動を進めた。サブグループの検討結果は、4, 6, 9月に所内検討会、10月の所外向け「原子炉実験所における加速器中性子源の開発およびその利用」ワークショップを通じて公表してきた。また、日本学術会議総合工学委員会、同エネルギーと科学技術に関する分科会及び京都大学原子炉実験所共催で、11月19日に日本学術会議講堂にて開催された公開シンポジウム「原子力・放射線の有効利用に向けた先導的研究の推進」にてその検討の概要を報告した。年度末にはこれまでの検討結果を本報告書としてまとめ、さらに次年度も検討を継続する予定である。

2. 大規模研究計画「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」(川端)

日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会が取りまとめた「提言 学術の大型施設計画・大規模研究計画 ―企画・推進策の在り方とマスタープランの作成について― (平成22年3月17日)」に採択された原子炉実験所提案課題を以下に示す。

複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進

①計画の概要

本計画では、人類社会の持続的発展に必要と考えられる原子力・放射線の新たな利用法の開発を含む複合的な原子力科学分野の発展を目指し、個々の研究者の豊かな創造性に基づく先導的な研究の実施を旨として、萌芽的・基礎的な実験研究に重点を置き、各種研究会の開催を織り交ぜつつ、共同利用・共同研究を推進する。その際、多様化する新たな研究ニーズに対応し得る施設・設備の導入・整備に努めつつ、原子力・放射線施設の特質に鑑み、原子炉実験所の教員が全国の研究者を組織して共同で行うプロジェクト研究を重視し、世界をリードする研究教育活動を発展的に展開するものとする。また、固定磁場強集束型FFAG 陽子加速器を用いた加速器駆動未臨界炉ADSR の開発に関する基礎研究については、同炉が安全性と核変換特性に優れた未来型原子力システムとして期待され、世界を先導する研究として国際的な注目を集めていることから、同研究の中核組織としての機能を果たすべく附属安全原子力システム研究センターを拡充・強化することにより、より一層の推進を図る。

②科学的な意義

本研究の科学的な意義は、原子力・放射線施設を用いる実験に重点を置いた共同利用・共同研究を軸に事業を展開することにより、複合的な原子力科学の裾野が拡大・発展し、より安全で効率的な原子力・放射線の利用を支える基礎・基盤的学術の新たな創成と展開につながり、それらの有効利用に道を拓くことにある。また、中性子捕捉療法研究等の成果を社会に発信・還元することにより、複合原子力科学の応用が暮らしに役立つものであることを示し、現代社会に蔓延する原子力・放射線に対する負のイメージを転換して、原子力・放射線の利活用が人類福祉に貢献するとの認識を社会的に醸成することにつながるものと期待される。さらに、学際分野における共同利用・共同研究体制の下で行う先導的な研究を遂行することにより、大学における教育研究活動にインパクトを与え、次代を担う俯瞰的視野を持った優秀な人材が育つものと期待される。

③所要経費

98 億円 (初期投資：60 億円、運営費等：38 億円)

④年次計画

平成22～31 年度 (10 年間)

(具体的な計画)

平成22～24 年度：コラボレーションリサーチラボ新営 (I 期、II 期) の整備を行う。

平成23～25 年度：イノベーションリサーチラボの整備を行う。

平成22～25 年度：FFAG 陽子加速器の性能向上を図る。

平成22～31 年度：固形廃棄物倉庫の増設、基幹整備等を行う。

平成22～31 年度：加速器駆動未臨界炉ADSR の開発研究を行う。

⑤提案する中心の実施機関または実施体制

京都大学原子炉実験所

京都大学原子炉実験所は、昭和38年に京都大学に附置され、以来、全国大学の共同利用研究所としての実績を重ねている。この実績をもとに、関連分野コミュニティの広い研究者群による共同利用・共同研究を軸に研究用原子炉等の施設・設備の有効活用を図り、核エネルギー利用と放射線利用を車の両輪として複合原子力科学に係る学術の発展に努め、国内のみに止まらず、アジアにおける国際的な実験研究の中核的拠点として機能しつつ、大学研究者等には先端的研究の場を、大学院学生等には実践的基礎科学教育の場を提供し、

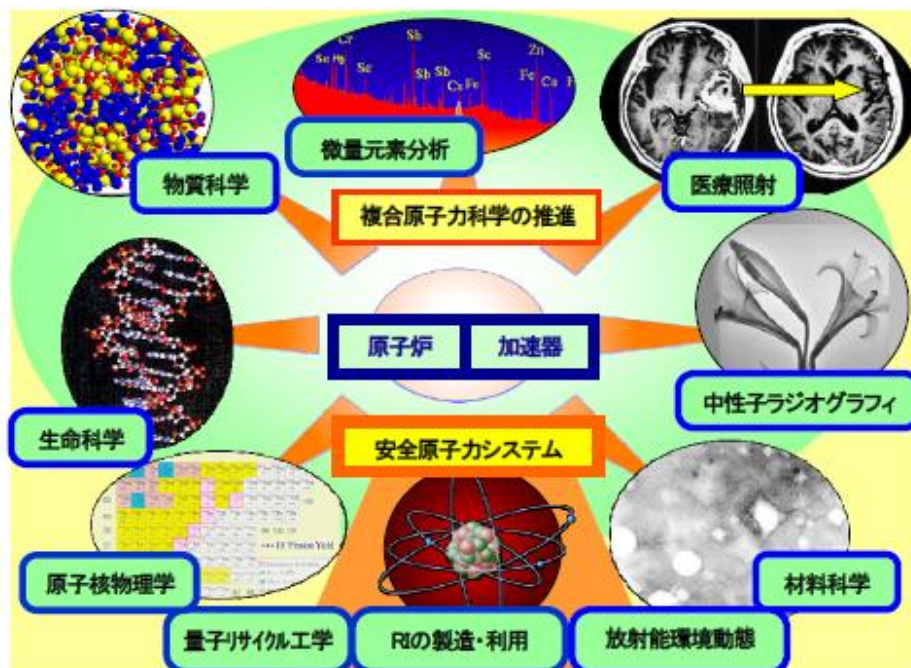
次代を担う人材の育成に寄与する。

⑥学術コミュニティの合意状況等

本計画は、旧文部省学術審議会特定領域推進分科会原子力部会の報告「大学における研究用原子炉のあり方について」（平成12年11月）に基づき、日本学術会議選出の委員を始め多数の学外者を含む運営委員会の下に設けた研究計画委員会を中心に検討を重ねてきたものであり、物理学・化学から工学・医学にわたる多くの研究者群からなる原子炉実験所の共同利用研究者グループ等によって強く支持されている。また、本計画を実施する体制としての共同利用・共同研究拠点の申請・認定に当たっては、関連分野コミュニティから多くのサポートレターを得ている。事業の軸となる共同利用・共同研究については、上記の運営委員会の下に設けた共同利用研究委員会等において方針の立案、課題採択等の具体的作業を行い、実施については、原子炉実験所の原子力基礎科学、粒子線物質科学、放射線生命医科学の3研究本部体制の下で、国内外の大学・研究機関等と協力・連携を図りながら推進していく。また、本事業の実施に不可欠な原子力・放射線の利用に係る安全確保及び法規制対応については、安全管理を担当する部・室を設けるとともに、安全管理本部が統括する体制として万全を期している。

⑦国際協力・国際共同

研究用原子炉関係では、韓国原子力研究所（KAERI）との研究協力協定に基づき、研究炉・HANAROを利用した共同利用・共同研究を実施する。また国際協力・共同として、現在外国の24研究機関との間で国際部局間協定を締結あるいは学術交流に関する覚書を交換しており、研究用原子炉の技術開発・利用研究、並びに原子力工学およびこれに関連した教育について、これら機関との学術上の協力・共同と研究者及び学生の交流を継続・発展させていく。FFAG 陽子加速器を用いた加速器駆動原子力システム(ADS)に関する基礎研究については、先導的研究として世界の注目を集めており、日本原子力研究開発機構（JAERI）を含む国内機関との協力に加えて、欧州のEUROTRANS プロジェクト参加機関であるFZK（ドイツ）、CEA（フランス）、PSI（スイス）、SCK・CEN（ベルギー）、ENEA（イタリア）などと実験及び解析の両面における国際協力研究を推進する。また、アジアADS ネットワーク会合を通して、韓国、中国等との連携を強化して進める。



第1図 複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進

3. KUR 利用活性化検討

3. 1 KUR 利用活性化について (杉山)

3. 1. 1 はじめに

京都大学原子炉実験所は、これまでその研究用原子炉(KUR)を用いた共同利用・共同研究を推進することで高い評価を受けてきた。今年度、KUR は4年間の中断から再開し、共同利用件数は中断以前の水準を維持している。一方、当研究所は、将来計画として「複合原子力」を推進しているが、同計画が軌道にのり、KUR の担っていた役割を代替するには、今後10年程度の年月が必要と考えられる。したがってその時まで、研究所の研究活動・共同利用を維持し、むしろ向上させるためには、更なるKUR利用の活性化が必然であると考えられる。KURの活性化委員会を組織し検討を行った。

3. 1. 2 活性化の方向性

「KUR 活性化」を検討する場合には、常に共同利用における「質」と「量」の問題が存在する。本研究所が「大学附置研究所」であることを考慮すれば、「活性化」は、いたずらに「共同利用件数を追い求めるのではなく」、「質の高い研究を展開すること、または、そのような「シードになるような研究を発掘すること」に意義があると考えられる。ただし、「一定数の共同利用研究を支えることも重要な存在理由である」や、「ある程度の数がなければ、質の高い研究や特にシードの発見には結びつかない」という点は見逃すべきではない。そこで、活性化の方向は、

- ① 現有レベルの共同利用件数は維持する。(質・量両面の利用効率の向上)
- ② 今後の研究所の軸となる研究として、質の高い研究・シードを発掘する
とすべきでとして検討を進める事とした。

活性化委員会は、上記目的のために共同利用の動向及び研究炉の利用状況を分析した。その結果、

- A) 再開後の共同利用において所内発信のプロジェクト研究が増加している。(第2図)
- B) いくつかの低稼働のポートがある。(第3図)

ことに注目した。そこで、これらの低稼働ポートの利用活性化を念頭に置きつつ、プロジェクト研究の所内責任者の先生方とその研究を生かした研究炉利用研究の活性化について議論を行った。

3. 1. 3 研究提案および問題点

プロジェクト研究の責任者と議論および委員会内部における議論において出された活性化のための提案・要望等を以下に略記する。(各提案の詳しい内容については各責任者から提出して頂いた書類を添付するのでそちらをご覧ください) 内容に関しては、共同利用活性化型とシード型と一応分類した。ただし、分類はあくまでも概観するための指標であり、両者は厳密に分割できない事も留意する必要がある。

- 共同利用活性化型
 - ▶ 放射化分析のトータルパッケージ化(特にサポート体制の充実)
 - ▶ 材料照射における温度制御範囲の拡大・On line 計測の整備
 - ▶ 試料環境整備による中性子 Imaging 研究の活性化
 - ▶ PGA 研究の新たなポート設置
 - ▶ 中性子ビームの光学素子開発利用
 - ▶ 小角散乱の関西地区の企業の材料研究との連携
- シード型
 - ▶ 府大獣医学部との連携による動物癌の研究
 - ▶ BNCT 技術の発展系としてのボロントモラフィー

- ホウ素中性子捕獲反応による育種研究
- 中性子注入による原子転換新素材創成
- 陽電子ビーム利用
- アクチノイド系短寿命 Isotope 製造 (PGA)
- 生物の各構造レベルにおける中性子照射効果評価ポートの設置若しくは評価手法の確立(ビームにおける混入 γ 線の影響評価)
- 中性子照射と X 線回折の同時計測による新たな構造解析
- その他の方向性
 - 他のグループへのポートの貸出
 - 企業利用誘致
 - 炉室内での試料条件等の緩和(他の施設との差別化)
- 以上添加していく上、5 MW の運転時間増加は必須である。

3. 1. 4 提言

上記の提案を現在の空きポートの状況を踏まえて検討した結果、以下の利用展開を期待できる。

① B-1

アクチノイド系短寿命核・陽電子生成ビームラインとして再活用すべきである。今後の原子炉利用の核になると期待。

② B-2(TAS)

現在、東北大学のグループと 3 軸分光器として再立ち上げを検討中。この場合、ビーム強度の低さを考慮した上で、他の分光器に対する位置づけを明確にし、3 軸分光器としての利用価値を検討。また、再立ち上げとなった場合の受け入れ体制についても検討が必要である。

③ B-3

未定(ただし、B-2 での検討課題をこちらで実施する可能性がある)

④ E-2

理研グループによる Imaging 利用が行われている。今後、共同利用にも供せられる予定。

⑤ E-3

B-4 の飽和状態を緩和すべく、PGA 利用のラインとして再活性化が有望。そのためには導管のスーパーミラー化を行い、広帯域でのビーム強度の増加を行う必要がある。

⑥ CN-1

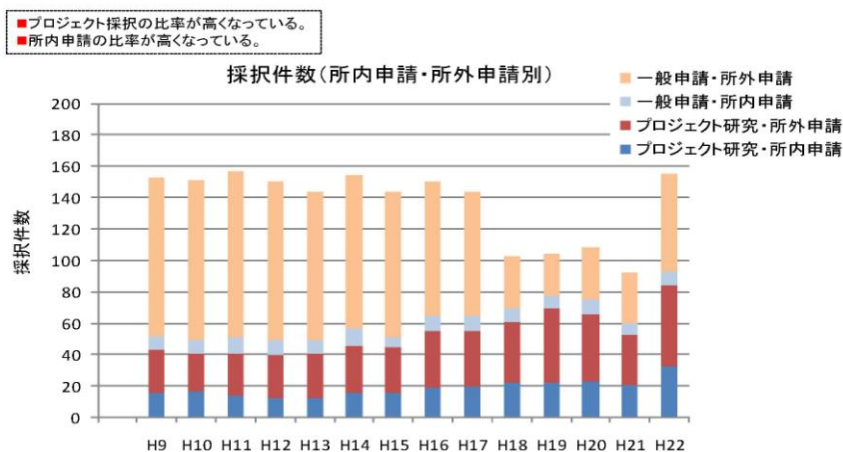
BNCT 用のホウ素濃度測定用のラインとして利用を検討中

3. 1. 5 条件

本計画の成功の条件は「資金」「人」「規制緩和」の 3 点であると考えられる。「資金」は、言うまでもなく装置・施設の改造・新設には経済的な裏付けがないと実行できない。本計画の執行には、最低**円は必要と考えられる。「人」とは、装置を運用していく人員である。研究所における「研究」の質を高めるためには、研究者(教員)の時間をより多く研究そのものに振り向けるべきであり、装置の維持管理等の運用のための技術職員を充実すべきである。このことは、専門的な知識を持つ技術職員による装置の高いレベルでの維持管理を期待できる。もちろん、教員自身が装置の維持管理に関与する事も必要である。この場合、一部の教員にのみ負担がかかるような事がないように、実験所所属の教員(研究室?)は、所内の共同利用装置の運用に関与し、エフォートの 5-10%を供出するように心がける。「規制緩和」は、原子炉実験所の独自性を出す Key point の 1 つである。現在、使用が炉

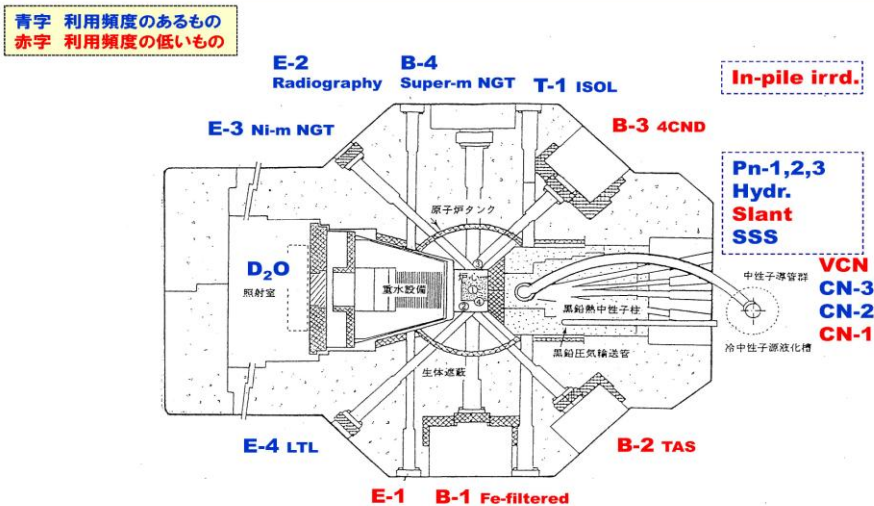
室内での使用が不可能な非密封線源の使用解禁などのユーティリティの向上を望める規制緩和や他大学・民間企業の研究者の占有的ビームポートの利用の許可など運用上の障害を取り除き、多様な放射線利用の可能なかつ開かれた環境の活発な研究所への転換を目指す。

共同利用年間採択件数の推移(プロジェクト/一般、所内/所外別)



第2図 共同利用件数の推移

KURのポテンシャルを活かす(第1回での議論)



第3図 ビームポートの利用状況

3. 2 医療照射設備改造案（桜井）

3. 2. 1 京都大学研究炉(KUR)炉室、現在の重水中性子照射設備の更新

3. 2. 1. 1 設備の概要・導入(更新)の必要性

【設備の概要】

重水中性子照射設備では、中性子エネルギースペクトルシフターの重水厚さの調整、および、2枚のカドミウム製熱中性子フィルターの開閉により、ほとんど純粋な熱中性子から熱外中性子まで様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能である。本設備は、主に医学生物学分野を中心に利用され、特に、硼素中性子捕捉療法(BNCT)で多大な成果を上げてきている。H22年12月末の時点で、脳腫瘍162件、頭頸部腫瘍104件、悪性黒色腫23件、肺腫瘍7件、肝腫瘍7件、その他3件の合計306件のBNCT医療照射が本設備で行われている。

これまで、利用者の要望に答える形で、本設備の改修が2度行われている。1度目の改修は、H7年度に、BNCTの高度化を主目的に、(1)設備の安全性の向上、(2)熱中性子から熱外中性子までの利用を可能とする性能向上、(3)5MW連続運転中の医療照射を可能とする等の使い勝手の向上、の3点に関して行われた。このとき、重水タンクをはじめ本設備の構成要素を全面的に更新するとともに、遮蔽シャッターシステム、照射室、施療室、患者輸送システム等、設備周辺の整備も行われた。

2度目の改修は、H20年度に、H7年度の改修後の設備の老朽化およびBNCTの多様化への対応を目的に、(1)熱中性子フィルター装置の更新、(2)重水配管系統のパッキン・ガスケットの交換、(3)患者輸送システムの更新、(4)設備制御系盤ソフトウェアの更新、(5)線量モニターの更新、の5点に関して行われた。

【導入(更新)の必要性等】

H22年5月、4年間休止していたKURの運転再開とともに、本設備でのBNCT医療照射および共同利用も再開された。運転再開後のKURの運転パターンは、毎週火曜日昼頃から木曜日朝8時までの出力1MW運転が基本となり、BNCT医療照射がある場合のみ、木曜日の日中に医療照射に応じて出力5MW運転が行われている。必然的にBNCT医療照射は木曜日となり、医療照射を行っている他大学の日程調整の自由度が小さい現状にある。

一方、医療照射以外の共同利用については、従来の出力5MW運転時の1/5のビーム強度しか得られないため、一件当たりの照射時間が長くなっている。本設備の共同利用は、BNCT医療照射に関連した研究グループによる医学生物学系の利用が大半を占めており、医療照射と同様の条件での照射が希望されている。また、一件当たりの利用時間が長くなることにより、スケジュール調整が困難な状況に陥っている。

以上より、中性子ビームの高強度化が熱望されている。ビーム高強度化のためには中性子減速層をより薄くすることが重要であり、重水タンク全体の更新が必要となる。また、それに併せて、照射室、遮蔽シャッターシステム、等の更新も行う必要がある。なお、重水タンク全体を60cm程度薄くすることで、1桁以上の強度の増強が期待できる。

3. 2. 1. 2. 主な用途

本設備はKURに附属する主要設備の一つであり、BNCT医療照射を含め全国共同利用に供

する。主に医学生物学および物理工学関係の研究分野において利用されている。主な用途を以下に列挙する。

① 医療照射

BNCTに利用されている。従来は、脳腫瘍および悪性黒色腫のみを対象にしていたが、平成13年以降、難治性頭頸部腫瘍、多発性肝腫瘍や胸膜中皮腫等の体幹部腫瘍に適応拡大されている。

② 生物学利用

中性子照射による細胞および生体への効果・影響に関する研究に利用されている。

また、BNCTに関連して、新規硼素化合物の効果に関する評価も行われている。

③ 薬学利用

BNCTに利用する新規硼素化合物の研究に利用されている。硼素化合物の細胞および生体への取り込みや効果について評価が行われている。

④ 工学利用

主に、放射線検出器に関連した研究に利用されている。様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能であることを利用して、検出器の特性評価等が行われている。

⑤ 医学物理学利用

BNCTに関連して、設備の照射場特性、生体内での線量分布特性に関する評価を随時行っている。

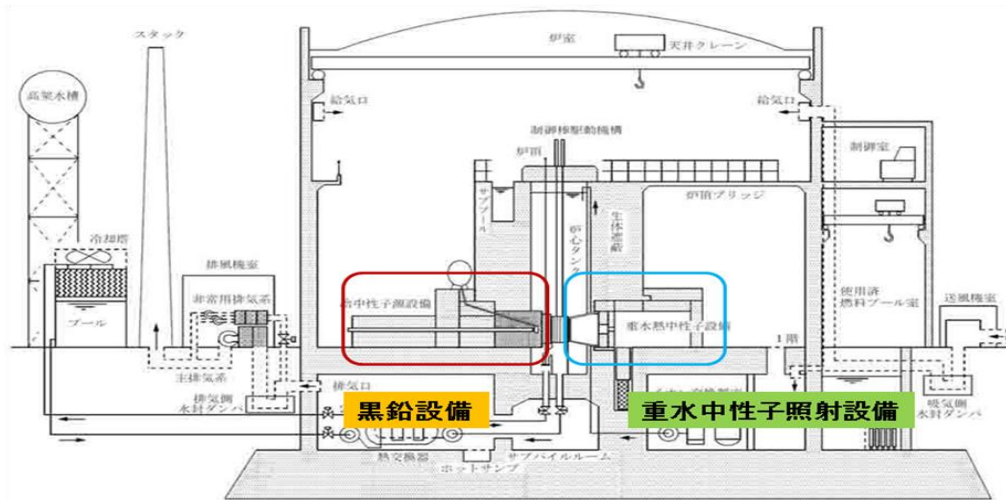
⑥ 学生教育活動

上記の各分野に関して、共同利用研究を通じて、全国の院生・学生の博士論文・修士論文・卒業論文に関する研究が実施されている。また、京都大学大学院工学研究科の「原子炉応用実験」の一テーマが行われている。

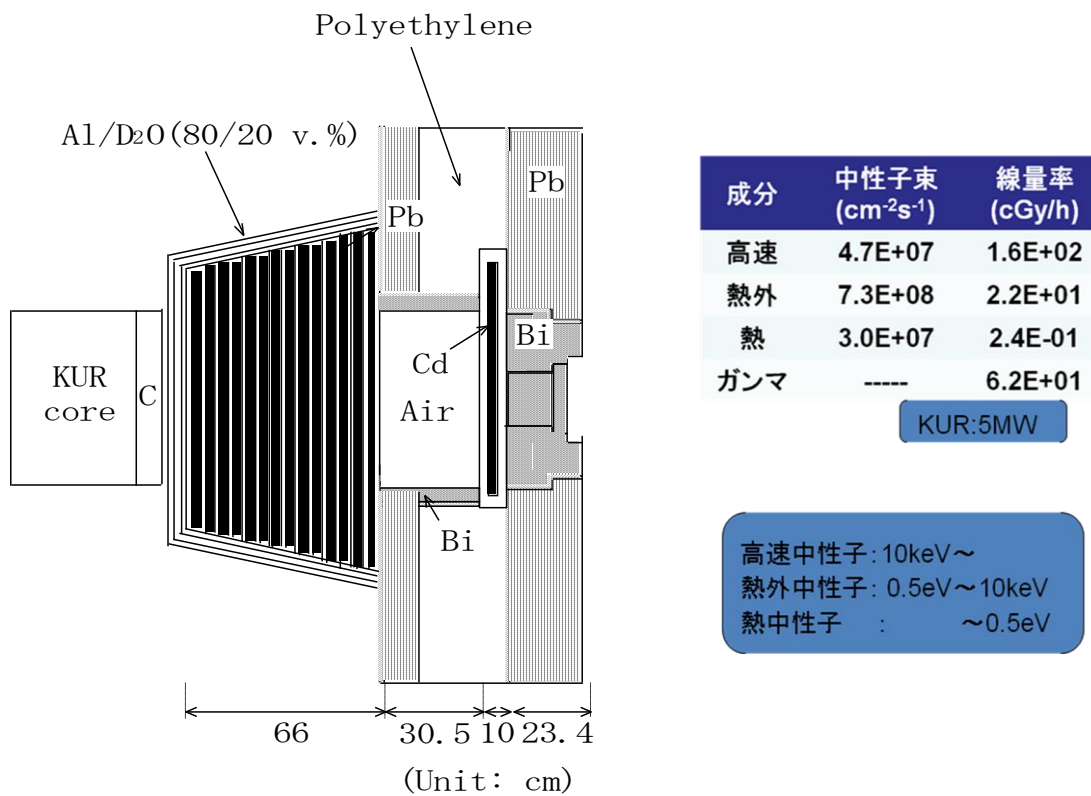
3. 2. 1. 3. 設備の導入(更新)による効果

本設備の中性子ビームの高強度化により、出力1MW運転時でも、従来の出力5MW運転に対応するビーム強度での共同利用が可能となる。その結果、共同利用一件当たりの時間が短縮され、スケジュール調整も容易になる。また、共同利用の受け入れ件数の増加にも対応しやすくなると考えられる。

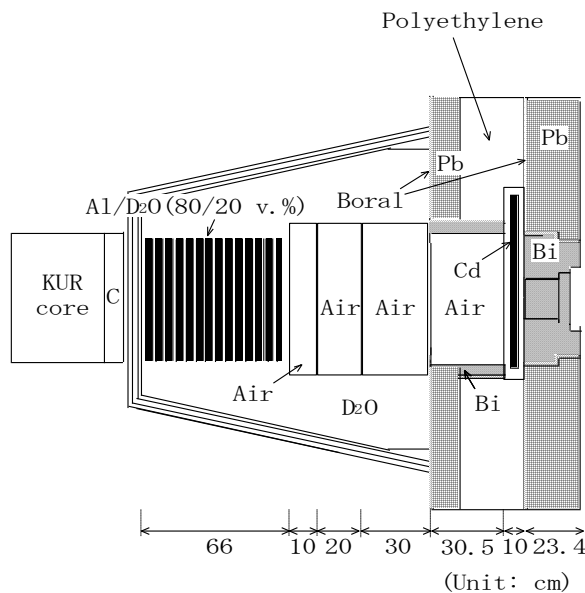
BNCT医療照射に関しては、1例当たりの照射時間が短縮される。特に、現状では比較的に無理な姿勢で長い照射時間を要することの多い頭頸部の症例においては、この時間短縮の効果は大きい。また、1MWでのBNCT医療照射の可能性もあり、医療照射のスケジュールの自由度が増すことも期待される。



第4図 現在の KUR 全体図



第5図 現在の熱中性子照射設備 (熱外中性子モード)



成分	中性子束 (cm ⁻² s ⁻¹)	線量率 (cGy/h)
高速	7.6E+08	2.9E+03
熱外	1.1E+10	3.6E+02
熱	4.4E+08	3.5E+00
ガンマ	----	1.3E+03

KUR:5MW

- ・ 3つの重水小タンクを除去。
- ・ 設備全体の厚さを60cm縮小。
- ・ Al/D₂O層を径方向に拡大。

- ・ 中性子束が15~16倍に増加。
- ・ ガンマ線は21倍に増加。

第6図 重水設備改造検討例

3. 2. 2 京都大学研究炉(KUR)炉室、新 BNCT 用中性子照射設備の設置

3. 2. 2. 1. 設備の概要・導入(更新)の必要性

【設備の概要】

新BNCT用中性子照射設備は、熱外中性子照射BNCTに特化した設備である。黒鉛設備を撤去し、本設備を設置することを検討している。新設備では、熱外中性子照射に特化していることから、中性子減速層にはフッ化アルミニウム等の固体減速材を採用する。現在の重水設備に比べて1桁以上の熱外中性子ビームの高強度化が期待でき、1MWでのBNCT臨床も可能になると考えらる。

なお、現在のBNCT用中性子照射設備である「重水中性子照射設備」では、ほとんど純粋な熱中性子から熱外中性子まで様々なエネルギースペクトルを持つ中性子照射が可能である。重水中性子照射設備は、主に医学生物学分野を中心に利用され、特に、硼素中性子捕捉療法(BNCT)で多大な成果を上げてきている。H22年12月末の時点で、脳腫瘍162件、頭頸部腫瘍104件、悪性黒色腫23件、肺腫瘍7件、肝腫瘍7件、その他3件の合計306件のBNCT医療照射が行われている。

【導入(更新)の必要性等】

H22年5月、4年間休止していたKURの運転再開とともに、重水中性子照射設備でのBNCT医療照射および共同利用も再開された。運転再開後のKURの運転パターンは、毎週火曜日昼頃から木曜日朝8時までの出力1MW運転が基本となり、BNCT医療照射がある場合のみ、木曜日の日中に医療照射に応じて出力5MW運転が行われている。必然的にBNCT医療照射は木曜日となり、医療照射を行っている他大学の日程調整の自由度が小さい現状にある。

一方、医療照射以外の共同利用については、従来の出力5MW運転時の1/5のビーム強度しか得られないため、一件当たりの照射時間が長くなっている。本設備の共同利用は、BNCT医療照射に関連した研究グループによる医学生物学系の利用が大半を占めており、医療照射と同様の条件での照射が希望されている。また、一件当たりの利用時間が長くなることにより、スケジュール調整が困難な状況に陥っている。

以上より、現在の重水設備の代わりに、より高強度の中性子ビームが得られる設備が熱望されている。そこで、黒鉛設備を撤去し、新BNCT用中性子照射設備を設置することを検討している。新設備は熱外中性子照射に特化しており、中性子減速層にはフッ化アルミニウム等の固体減速材を採用することを考えている。現在の重水設備に比べて1桁以上の熱外中性子ビームの高強度化が期待でき、1MWでのBNCT臨床も可能になると考えられている。

3. 2. 2. 2. 主な用途

本設備は、BNCT医療照射を含め全国共同利用に供する。主に医学生物学および物理工学関係の研究分野において利用される。主な用途を以下に列挙する。

① 医療照射

BNCTに利用される。脳腫瘍、難治性頭頸部腫瘍、多発性肝腫瘍や胸膜中皮腫等の体幹部腫瘍を対象に医療照射が行われる。

② 生物学利用

熱外中性子に対する細胞および生体への効果・影響に関する研究に利用される。

③ 工学利用

放射線検出器に関連した研究に利用される。

④ 医学物理学利用

BNCTに関連して、設備の照射場特性、生体内での線量分布特性に関する評価を行う。

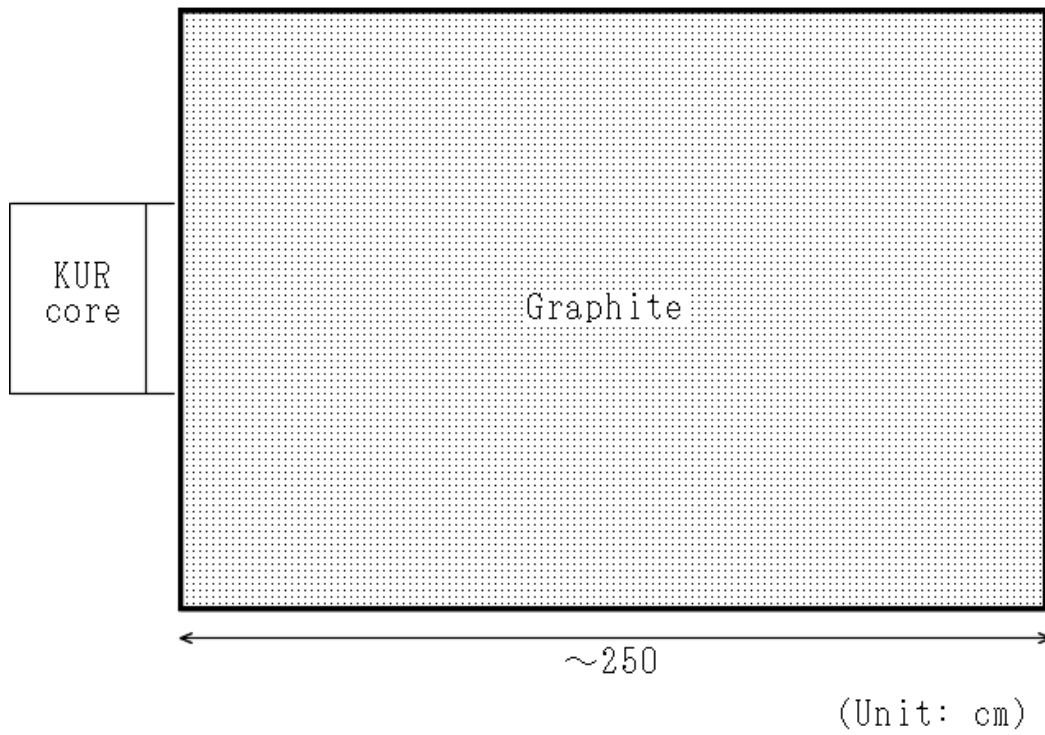
⑤ 学生教育活動

上記の各分野に関して、共同利用研究を通じて、全国の院生・学生の博士論文・修士論文・卒業論文に関する研究が実施される。また、京都大学大学院工学研究科の「原子炉応用実験」の一テーマが行われる可能性がある。

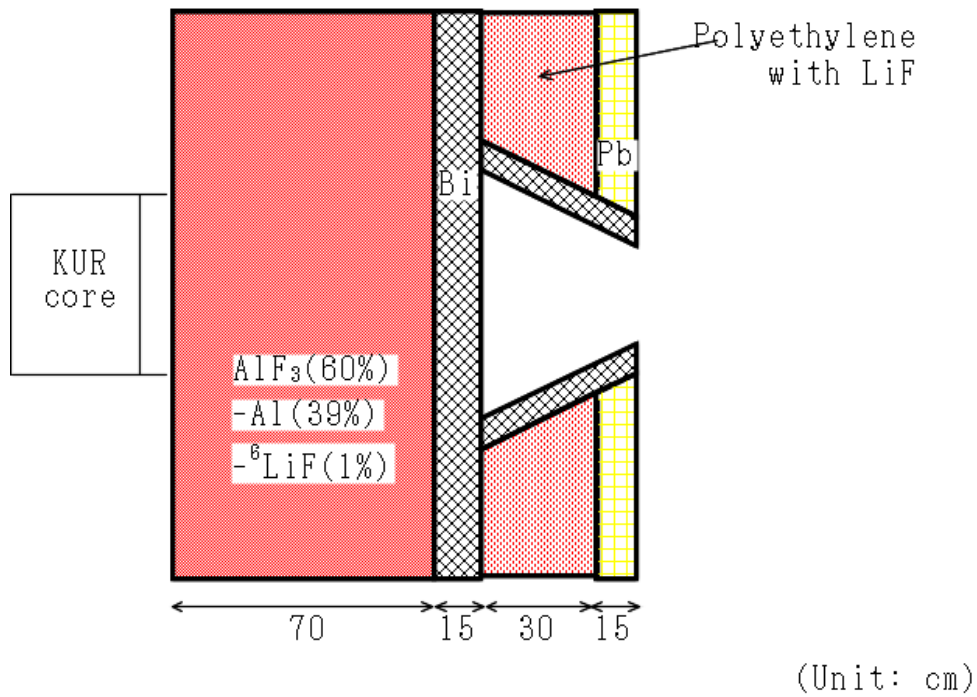
3. 2. 2. 3. 設備の導入(更新)による効果

本設備の設置により、出力1MW運転時でも、重水中性子照射設備での出力5MW運転に対応するビーム強度以上の共同利用が可能となる。

BNCT医療照射に関しては、1例当たりの照射時間が短縮される。特に、現状では比較的無理な姿勢で長い照射時間を要することの多い頭頸部の症例においては、この時間短縮の効果は大きい。また、1MWでのBNCT医療照射の可能性もある。



第7図 現在の黒鉛設備



第8図 黒鉛設備改造検討例

3. 3 BNCT 世界先端拠点構築計画（小野）

3. 3. 1 事業の必要性

【目的・目標】

原子炉実験所における「研究用原子炉及び加速器を用いた複合原子力科学の推進」の中心的課題であるBNCT研究において、ヒト癌患者を対象としたKUR中性子ビームによる臨床研究を推進すると共に、その基礎・臨床研究の推進に不可欠な研究資材、設備の準備、安全管理や国際学術交流などの体制の整備を行う。もって世界最先端研究拠点を形成し、同研究において世界を圧倒できるレベルにまで発展させる。

【必要性・緊急性】

癌のX線および粒子線による治療の進歩は著しいが、癌細胞が広範に浸潤しかつ細胞のX線感受性が低い癌や不整形かつ複雑に進展する癌は、斯かる高度な照射技術によっても治療が困難であるため斬新な治療法の開発が強く望まれている。とりわけ、癌が国民病となりその増加が著しい我が国にあってはその要請は強い。

BNCTは腫瘍集積性ホウ素化合物のホウ素原子核と中性子との核反応による極短飛程の高LET粒子でもって癌細胞を選択的に破壊する放射線治療の一つであり、上記の癌の治療法として期待が大きい。しかし、機序にホウ素化合物が介在するため研究は他の粒子線治療よりはるかに複雑で、適応を探る臨床研究と共に中性子の巧みな分布形成やホウ素化合物の体内での挙動の研究も必須である。この場合、研究の飛躍には可能な限りヒトに近い自然発生の癌動物を使った研究が不可欠である。そのため、マウス・ラットの小動物での研究結果から臨床研究を展開してきた従来の研究の限界を打破することの出来る本研究拠点の構築の緊急性・必要性は高い。

【独創性・新規性等】

本事業ではヒトBNCT研究をその中核として位置付け、その飛躍を図る目的でKUR中性子ビームによるヒト臨床研究を一層推進すると共に、京大原子炉実験所の近隣に所在する大阪府立大学獣医臨床センターとの共同で担癌ペット（愛玩動物）を対象にBNCT臨床研究を実施する。従来、ヒトBNCTの為の基礎研究では、我が国はもとより世界の殆どの研究が培養細胞およびマウス・ラットなどの小動物とそれらの移植癌を用いたものであった。その知見は有用ではあるが、ヒトBNCTに直ちに用いるには可成りの隔りがある。ホウ素化合物の体内での挙動などはマウス・ラットの小動物とヒトとでは隔りが大きい。こうした点から、ヒト同様の自然発生癌でヒトに可能な限り近い動物を用いたヒト臨床の前研究が出来れば、そこで得られる知見がヒトBNCTの発展に大きく貢献するであろうことは明らかである。例えば、ヒトとイヌの寿命の差を勘案すると、イヌにおけるBNCT後1年間の治療局所の観察はヒトで癌の治療や有害事象の有無を判断する5年間に相当する。こうしたペットBNCT臨床からヒトBNCT臨床への橋渡し研究やその体制は、BNCT可能な原子炉サイトと獣医臨床のサイトが近接して初めて可能となるものであり、斯かる条件に恵まれたサイトは世界的にも珍しく、他では実現不可能な世界最先端研究拠点到に相応しい独創的かつ新規性の高い構想である。この体制によってヒトへの応用性の極めて高い知見が得られると共に、BNCTに係る研究者の育成にも貢献し、さらには獣医癌治療にも新局面を拓くことが出来る。更に、本事業は台湾国立清華大学・原子力研究所および台北荣民総院・

がんセンターとのBNCT共同研究の三者協定（締結済み）に基づく臨床・基礎両面での研究推進も含んでおり、世界的研究拠点に相応しい国際性も有している。

【第2期中期目標及び中期計画（素案）との関連性】

京都大学の中期目標に「学問の源流を支える基盤的研究を重視するとともに、学問体系の構築と学術文化の創成を通じて地球社会の調和ある共存に資する」とあり、中期計画では「基盤的・先導的研究環境を維持発展させるとともに、人文学・社会科学・自然科学の全分野で研究の深化と新展開を目指す本学独自の戦略的研究支援体制を整備する」とある。

また、中期目標に「先端的、独創的、横断的研究を推進して、世界を先導する国際的研究拠点機能を高める」とあり、それに対応して中期計画では「共同利用・共同研究拠点、産官学連携拠点並びに研究施設等の特色ある研究活動及び横断的な研究活動を支援し、国内外との先端的共同研究を推進する」とある。

本計画はこれらの項目の何れとも良くと符合・関連する。

3. 3. 2. 事業の取組内容

〔全体計画〕

研究用原子炉及び加速器を用いた複合原子力研究の推進における中心課題の一つであるBNCT研究を、KURによるヒトBNCT臨床研究の一層の推進と近隣の大阪府立大学獣医臨床センターとの共同研究によって強化・飛躍させる。担癌のペット（愛玩動物）を対象とするBNCT臨床研究は、マウスやラットの癌での研究とは異次元のヒトBNCTへの近接性を持つ橋渡し研究である。担癌ペットを対象としたBNCTの具体的な手順は以下の様である。獣医による診察、CTなどの画像診断によって癌の部位と進展程度を把握する、次にホウ素化合物を投与し、全身麻酔をかけ、照射台に固定、照射開始直前に採血、血中ホウ素濃度を即発ガンマ線分析で行い、中性子束密度を勘案して照射時間を決定、その後は、獣医臨床センターに連れ帰り、経過を観察する。腫瘍の反応、正常組織の反応が、ホウ素濃度と中性子量から計算された線量から考えて、妥当であるかどうかを検証する。また、全身的な有害事象の発現についても注意深く観察する。これは、BNCTにおける高LET放射線の効果をX線等価な量に換算する係数、それらはマウス、ラットの実験から求めた換算係数であるが、の妥当性を検証する重要な研究でもあり、その結果はヒトBNCTへの応用の安全性を担保することになり、ヒトBNCT研究を加速する。更に、台湾国立清華大学・原子力研究所および台北榮民総医院・がんセンターと臨床・基礎両面でのBNCT共同研究を推進する。

こうした、研究事業を推進する上で必要不可欠な資材、設備等を本事業の資金で整備し、かつ体制を整備する。

〔平成23年度事業に実施する事業内容〕

- ① BNCT研究に用いるホウ素化合物（試薬BPAとBSH）の調達（海外からの輸入）。
ヒトBNCT年間80件、ペットBNCT年間20件を目標
- ② 中性子照射に際してのペットの全身麻酔に必要な麻酔器の整備。
- ③ 麻酔薬の調達。
- ④ 既存中性子導管のスーパーミラー化による利用可能中性子束の増強を図りBNCTの実施に不可欠な生体試料中のホウ素濃度の測定を容易ならしめる。

- ⑤ 研究全体の円滑かつ効率的な実施のため夜間放射線管理要員（外部委託）の配置。
- ⑥ 研究成果の国内外への発信と学術交流の推進。特にBNCTに関しての研究協力協定を締結している台湾国立精華大学・原子科学研究所、台北榮民総医院がんセンターとの交流事業の促進。

こうした取り組みによって BNCT の世界最先端研究拠点を構築する。

3. 3. 3. 事業の実現に向けた実施体制等

【実施体制】

現在原子炉実験所で組織されているBNCT研究グループが研究実施主体であり、本研究計画を責任をもって実施する。

ヒトBNCT臨床研究は原子炉実験所のBNCT研究グループが他の研究教育および医療機関の共同研究者（医師研究者主体）と共同で、ペットBNCTに関しては原子炉実験所のBNCT研究グループが大阪府立大学獣医臨床センターの獣医放射線学、獣医外科学の研究者と共同して実施する。このための協定は締結済みである。

また、これらの研究に使用される実験装置の改造等は、その装置の専門家の所属する研究室が実施主体となる。さらに、研究炉関係は研究炉部が、実験設備関係は実験設備管理部が、そして放射線安全管理関係は放射線安全管理部がサポートする。

【工夫改善の状況】

研究そのものは、BNCT研究グループが責任をもって実施するが、本計画に関与する部署は多岐にわたるため、研究計画委員会が関連部署、具体的には関連研究室、研究炉部、実験設備管理部等の連携をサポートする。

3. 3. 4. 事業達成による波及効果等（学問的効果、社会的効果、改善効果等）

今日、国民の50%が癌に罹患し1/3が癌で死亡する状況が示す如く、癌は国民病であり人口の高齢化に伴ってこの傾向は益々進むと考えられている。そうした中、治療では癌の治癒の有無に加えその質が問題にされる時代となっており、患部が本来持っている形態や機能を失うことなく癌を治癒させることが求められている。放射線による癌治療はこれに応え得る手法であり、粒子線治療、強度変調X線治療、さらに医用画像と照射技術を一体化した画像誘導X線治療など、最近の進歩は目覚ましい。然りながら、癌細胞が主病巣の周囲に広範に浸潤しかつ細胞のX線感受性が低い癌や不整形かつ複雑に進展する癌、さらには呼吸や腸管運動などの生理現象に伴って標的病巣が照射中に移動するものにあっては、斯かる高度な照射技術をもってしても治癒照射の困難な場合が多い。BNCTは腫瘍集積性のあるホウ素化合物を投与し、その後中性子を照射、中性子とホウ素原子核の反応で放出される極短飛程の高LET粒子でもって癌細胞を選択的に破壊する放射線治療の一つであり、最近の高度放射線治療技術でも対応しきれない癌の治療法として大いに期待されている。しかし、中性子照射とホウ素化合物という複数の要素からなるため、その研究は複雑で困難な点が多い。特に基礎研究の多くがヒトとはサイズや薬物の体内での挙動が異なるマウス、ラットを用いて行われ、そのデータが直ちにはヒトBNCTに応用し難い。本事業の中心であるペット癌を対象にしたBNCT臨床研究は基礎研究とヒトBNCTを一気に近づけ研究を加速することは間違いないと考えられる。

3. 3. 5. 特別経費の事業として実施する理由及び事業計画期間終了後の取組みの予定

①本事業は、世界のBNCT研究をリードしている原子炉実験所での研究水準を更に引き上げ、当該領域における世界の研究を圧倒する確固たる基盤を確立するために行う事業である。この分野の研究を実際に行うことに関しては国内外で原子炉実験所に比肩しうるところは無く、原子炉実験所こそが最も効率的・効果的に行える研究主体である。

②BNCT研究に関しては、全国からの利用研究者の要望に応じて行う共同利用研究というよりは、原子炉実験所がリードする共同研究である。また、それによって高度な研究実施環境を確立することにより、将来的にはそれを共同利用にフィードバックすることもできる。このように、外部資金に適した単目的の研究ではなく、かつ共同利用研究でもない、将来の共同利用を見据えた最先端研究を開拓する活動であることが、今回の事業の特色である。さらに申請書の事業名に示すように、本申請では拠点構築を目的としていることから、特別経費事業として実施することが相応しいものである。

③事業計画期間終了後は、本計画の成果で得られたブレイクスルーによって形成した世界の研究水準を圧倒する世界最先端研究拠点を、我が国の研究者に対する共同利用研究にも広く供せるように整備することによって本事業の成果を全国の研究者にも享受できるようにする。その結果、当該領域における我が国の研究全体を世界を圧倒する水準へと引き上げることができる。

3. 3. 6. 参考資料

(1) 当該事業を実施することにより、既存の教育研究等へ与える影響

原子炉実験所には粒子線腫瘍学研究センターがあり、BNCT研究及び関連教育を実施してきた。本事業は本センターの設置目的に合致しており、既存センターの果たすべき研究教育等の推進を助長するものである。

(2) 部局内での検討状況

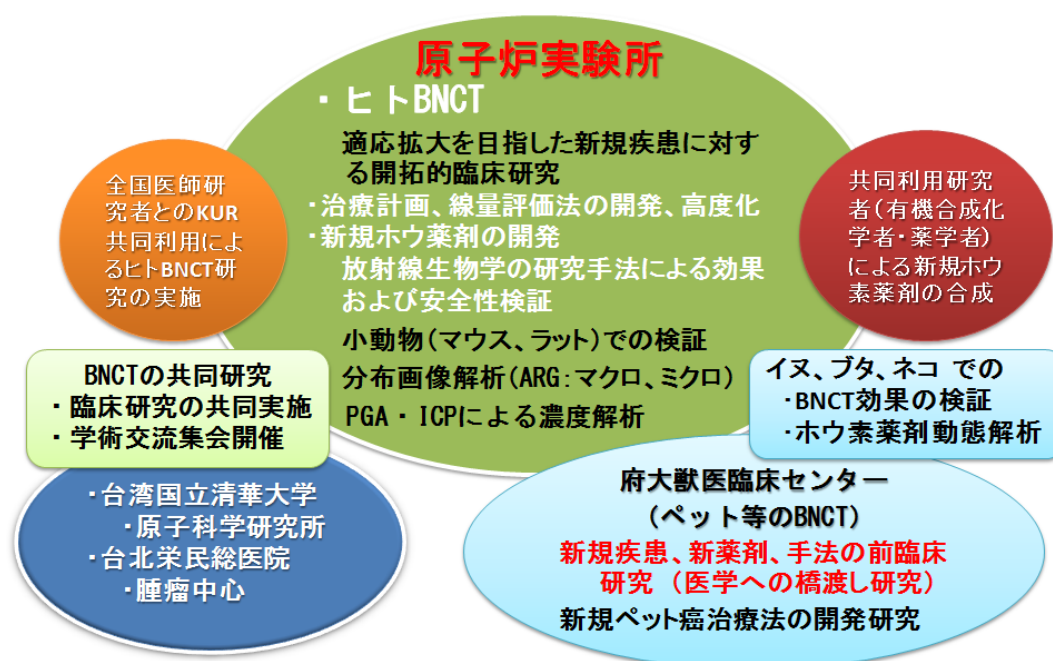
原子炉実験所の研究計画全般の検討を行うため、研究・教育担当副所長を委員長とし、学外・所外研究者も参加する研究計画委員会が設置されている。その下に、複合原子力推進検討小委員会が設置されており、原子炉実験所将来計画立案及び共同利用研究活性化方策の検討を行っている。

本プロジェクトのような比較的大きな研究活性化活動を行う場合、「小委員会」の下にアドホック的に検討グループを組織し、全所的観点から推進策を検討する。また、これらの検討結果は、親委員会及び協議員会（教授会に相当）に報告し、より広い観点から検討内容にフィードバックをかける。本申請においては、これらの手順を行い、さらに所長による最終的な決定を踏まえて提出されている。

(3) その他留意事項

原子炉実験所では、将来計画として「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」を掲げ、日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会が取りまとめた「提言 学術の大型施設計画・大規模研究計画 一企画・推進策の在り方とマスタープランの作成について」（平成22年3月17日）の選定した43課題のうちの一つに選ばれた。さらに、それらの計画の優先順位等を審議するために、科学技術・学術審議会

学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会によって評価が行われ、「学術の大型プロジェクトの推進について（審議のまとめ）－学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想「ロードマップ」の策定－（平成22年9月2日）」としてまとめられたが、ここでも二つの評価基準の両方ともに「a」と評価された8課題のうち選ばれた。その評価として、「大学が有する我が国唯一の教育・研究用の原子炉として、運転を持続させるとともに、維持発展すべき」、「利用分野は広がっており、特にガン治療などの医用について国民の理解が得られる。」とされている。ここでがん治療と述べられているのが、中性子を利用した癌のBNCT研究であり、科学技術・学術審議会からも必要性・緊急性が示されている。



第9図 BNCT 世界最先端研究拠点構築の全体概要

3. 4 研究炉併設中性子ビーム利用材料科学ラボの提案（高宮）

3. 4. 1 設備等の概要・導入(更新)の必要性

【設備等の概要】

京都大学研究用原子炉（KUR）の照射孔（B1、B2）を改修し設置する大型実験装置で、陽電子照射ビーム供給、特殊試料の中性子照射、放射化分析実験等の、複数の中性子ビーム利用実験の機能を有する。本装置を導入することで、国内では稀有な、陽電子寿命測定による半導体や高分子などの固体試料の物性研究及び超短寿命核種の利用による放射化学実験の場（中性子ビーム利用材料科学ラボ）を、学内研究者及び共同利用研究者に提供する。

【設置(使用)場所】

原子炉実験所 原子炉棟炉室

【導入(更新)の必要性等】

KURに設置されているB1およびB2照射孔に設置されている実験装置（鉄フィルター照射装置および3軸中性子回折装置）は、旧設計による装置であるため使用頻度が極めて低い装置となっている。KURの中性子リソースの有効利用のために、B1、B2照射孔の抜本的改修が必要であり、現在新たな中性子利用法として注目されている陽電子照射および溶液材料への中性子照射による材料科学研究を世界に先駆けて実施するために本申請の装置の早期の導入が望まれる。

【利用形態】

※学内共同利用、本設備の利用体制及び維持経費の確保についても記入

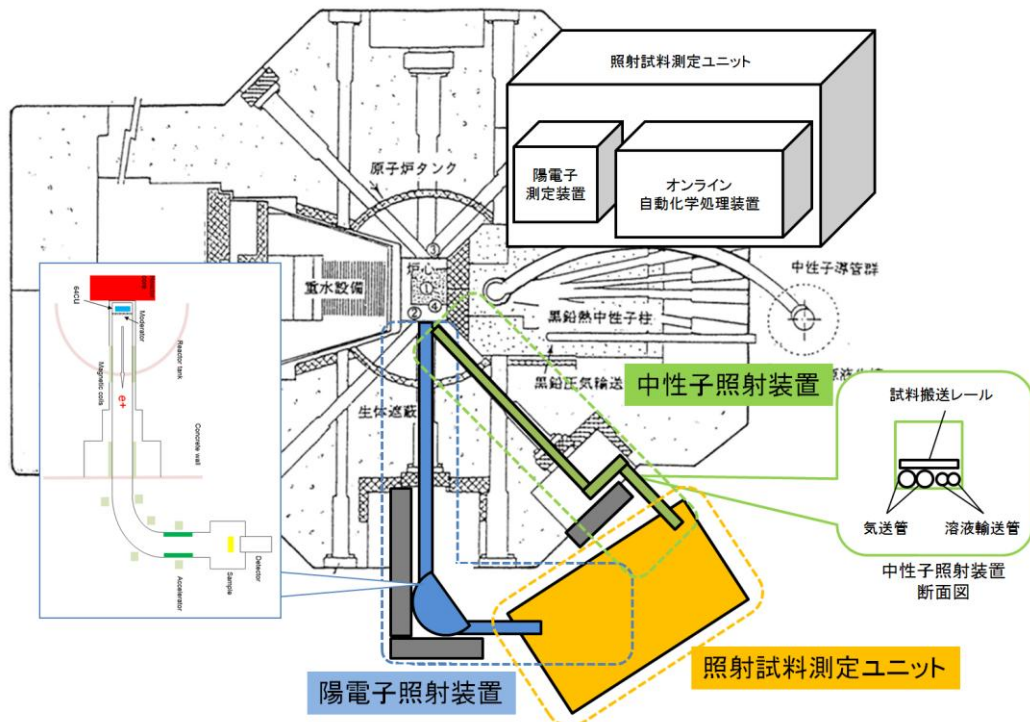
実験所内の職員が主として研究に用いるとともに、全国共同利用設備として学内外の材料科学研究を行う研究者が利用する。原子炉実験所は全国共同利用施設であるため、体制はすでに整っている。維持経費については実験所内の他の共同利用設備の維持経費と同様に実験所の運営費を用いる。

3. 4. 2 主な用途

本設備は、原子力システムに関連する材料を主とした様々な材料の試験研究を行うための設備であり、陽電子照射装置により生成する陽電子ビームを用いた固体材料中の欠陥測定や液体材料の界面観察、中性子照射装置によって照射された液体材料試料や大型固体試料の放射化分析法による元素分析や生成する放射性トレーサーを用いた固体液体材料中の元素の移行挙動の観察などを照射試料測定ユニットにて行う。

3. 4. 3 設備等の導入(更新)による効果

原子炉実験所においては、これまで圧気輸送管照射設備や低温照射設備、精密制御照射装置を用いた各種材料への中性子照射による材料研究が行われてきたが、本設備の導入により陽電子ビームによる材料中の欠陥測定や、液体試料や中性子照射した材料の欠陥分析などが可能となる。特に、透過型電子顕微鏡で観察が出来ない欠陥のサイズや分布を直接観測することで材料損傷の基礎過程や材料の物性変化の解明が可能となり、液体試料や大型固体試料の中性子照射装置によって材料研究の対象物質を広げることができる。また、原子炉実験所は核燃料物質などのアクチニド元素を用いた実験が可能な数少ない施設であり、陽電子ビームによる核燃料材料の物性研究や使用済み核燃料に含まれる様々なアクチニド元素の環境移行挙動の研究といった特徴的な研究を行うことが可能となる。このように材料研究のための手法および対象物質が拡張されることにより、学内外の共同利用者を含むより多くの研究者への利用が期待され、材料研究のさらなる発展に寄与するとともに、材料研究以外の新たな研究シーズの発掘にもつながることが期待される。



第10図 研究炉併設中性子ビーム利用材料科学ラボの全体概要

4. ADS 研究の現状と今後の研究計画（三沢）

4. 1 ADS 研究

加速器と原子炉とを複合した加速器駆動未臨界炉（Accelerator Driven Subcritical System: ADS）は、近年の加速器技術と原子炉技術の発展に依拠したハイブリッド技術を基盤とする新しいシステムである。ADS は、加速器を用いた核破砕反応等を利用して発生させた大量の中性子を未臨界炉に入射することにより、核分裂連鎖反応を引き起こして維持し、未臨界炉中での中性子の増倍を通じてエネルギーを発生、増幅させるものであり、加速器の運転を停止すれば未臨界状態の原子炉は必然的に停止することから、原子炉の暴走事故に至る反応度余裕が大きく、安全性の高いシステムとなる可能性を秘めている。また、未臨界炉では核分裂連鎖反応に寄与しない中性子が多く存在することが許され、かつ、臨界状態にする必要がないので、原子炉の燃料となる核分裂性物質に加えてトリウムなどの核分裂可能物質やマイナーアクチニドや長寿命核分裂生成物等の核変換処理対象物質をより多く装荷し得ることから、燃料増殖特性と核変換処理特性の向上が期待でき、核燃料の種類や形態についても自由度が増して核燃料サイクルに柔軟性が生まれるものと期待される。特に、核変換処理システムとして成立性は ADS の最も着目される特徴で、これまでに世界各国で研究開発が進められてきている。

一方、京都大学原子炉実験所では新しい中性子源としての ADS に着目して研究が進められ、2004 年度より文部科学省の「革新的原子力システム技術開発公募事業」の「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」として新設の FFAG 加速器と京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）の A 架台を組み合わせた実験により ADS 研究を行ってきた。

本年度は以下のような研究を行った。

- ① FFAG とトリウム体系を組み合わせて行った反応率測定実験の解析
- ② KUCA 付設のパルス状中性子発生装置（DT 加速器）とトリウム体系を組み合わせた反応率測定実験とその解析
- ③ DT 加速器と臨界に近い熱体系の炉心を組み合わせた反応率測定実験とその解析
- ④ FFAG で用いる中性子発生ターゲットの設計
- ⑤ 中性子源として用いる ADS の設計

ここでは、④と⑤の成果についてまとめる。

4. 2 FFAG で用いる中性子発生ターゲットの設計

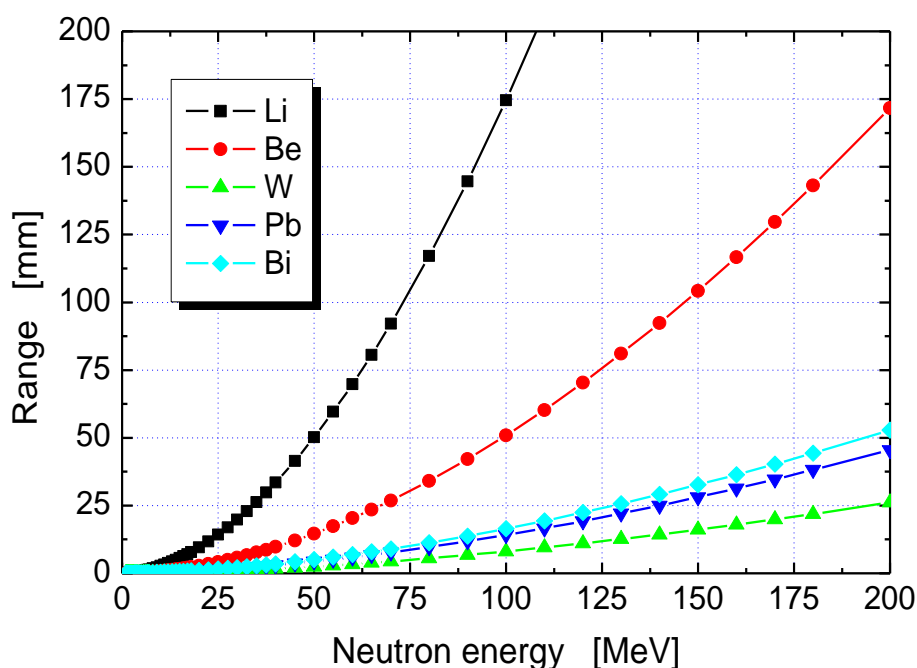
ターゲットから発生する中性子の発生量やエネルギースペクトルは、入射陽子のエネルギー、ターゲット材料及び、その厚さによって定められる。これまでの実験においては中性子発生ターゲットとして 10 mm 厚のタングステンを用いていたが、今後の実験を考える上で新しい別のターゲットについて設計を行い、中性子発生量、中性子エネルギースペクトルの評価を行った。

ターゲット材料として、実験に用いたタングステン(W)、現在、核破砕ターゲットとして考えられている鉛(Pb)、ビスマス(Bi)といった重核種に加えて、軽核種のリチウム(Li)とベリリウム(Be)の検討を行った。これらのターゲット厚は飛程計算コード SRIM を用いて、入射陽子が完全に止まる大きさとした。計算に必要な断面積データは ENDF/B-VI.6 及び LA150 を用いたが、リチウムとベリリウムはそれらの断面積ライブラリに格納されていないため、MCNPX 内にある LAHET コードの核物理モデル(理論的な核子と入射粒子相互作用モデル)のデフォルト設定される Bertini モデルを用いた。導出する中性子の発生量は、ターゲット面から発生する中性子を評価したものである。表 1 に 100 MeV 陽子入射による各ターゲット材料の特性をそれぞれ示す。タングステンターゲットは他のターゲット材料よりも中性子発生量が最も高く、鉛、ビスマス、ベリリウム、リチウムの順に発生量が高い。重核種は軽核種の比最低でも約 1.5 倍の中性子が発生しており、陽子の飛程もずっと短く、

軽核種ターゲットに比べ薄い。一方、熱特性に対して評価すると、熱伝導率はベリリウムが最も良く、融点もタングステンに次いで高い。その他のターゲット材料は熱伝導率、融点共に低く、固体ターゲットとして利用しにくいことが判った。

次に、各ターゲットから発生する中性子のうち、検出器内 ($0^\circ \sim 7.8^\circ$ 方向) に入射する中性子スペクトルを求め、その結果を第 1 2 図に示す。中性子スペクトルの形状は、重核種と軽核種で大きくこと異なることが判る。スペクトルを詳細に検討すると、エネルギーが比較的低い 5 MeV では重核種の中性子束が高く、5~75 MeV では軽核種の中性子束が重核種に比べ 1 桁近く高い。さらに、75 MeV 以上のエネルギーでは 2 桁近く軽核種の中性子束が高いことが確認できる。このことから、軽核種ターゲットは陽子入射によって発生する前方方向の中性子束が重核種より高い上、同じ陽子エネルギーを用いた場合であっても高エネルギーの中性子束が存在することが判った。

以上のことから、KUCA で行われる ADS に関する基礎実験には、5 MeV 程度の比較的低いエネルギーの中性子を利用する場合にはタングステンのような重核種を用い、より高エネルギーの中性子に着目したい場合にはベリリウムのような特性を持つターゲットが好ましいと考えられる。

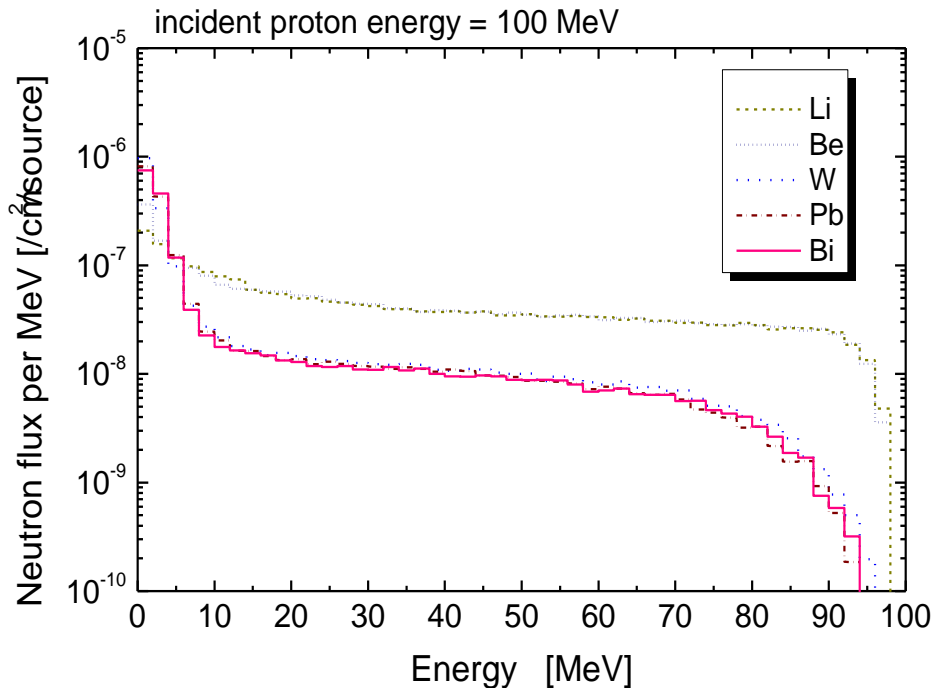


第 1 1 図 入射陽子エネルギーに対する各材料の飛程

表1 ターゲット特性

Target material	Thickness [mm]	Melting point [°C]	Boiling point [°C]	Thermal conductivity [W/m/K] (300 K)	Neutron yield [/cm ² /source]	Relative error
Li	177	180.54	1347	77	1.04E-03	0.12%
Be	53	1278	2970	200	2.97E-03	0.09%
W	10	3422	5555	178	5.81E-03	0.08%
Pb	16	327.5	1750	35	5.28E-03	0.08%
Bi	19	271.4	1561	9	4.53E-03	0.08%

融点は理科年表、熱伝導率は理化学辞典より引用

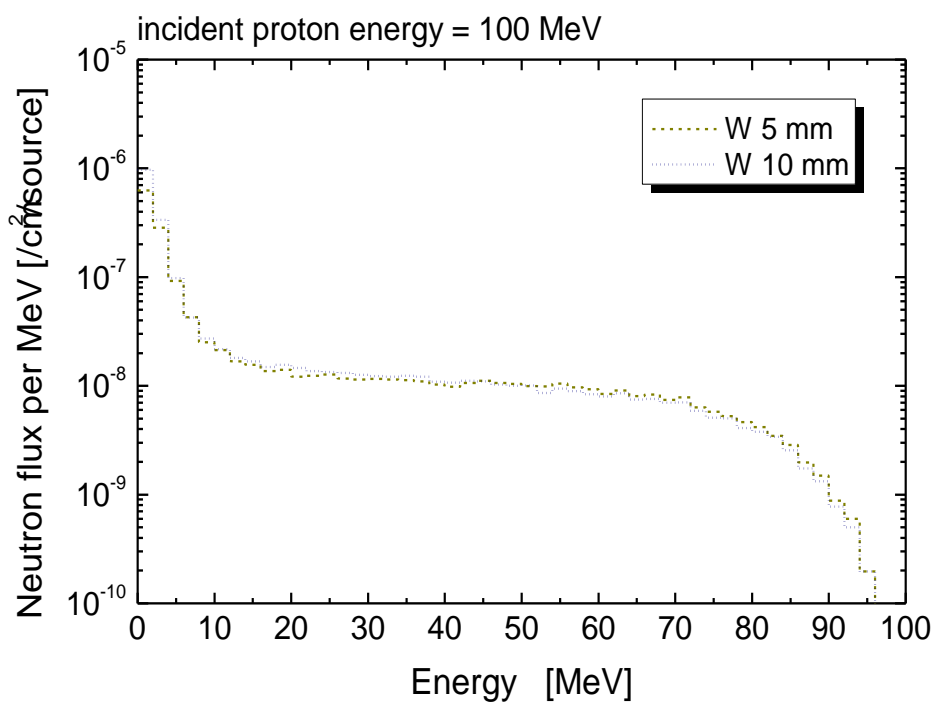


第12図 100 MeV 陽子入射により各ターゲットから発生する中性子スペクトル

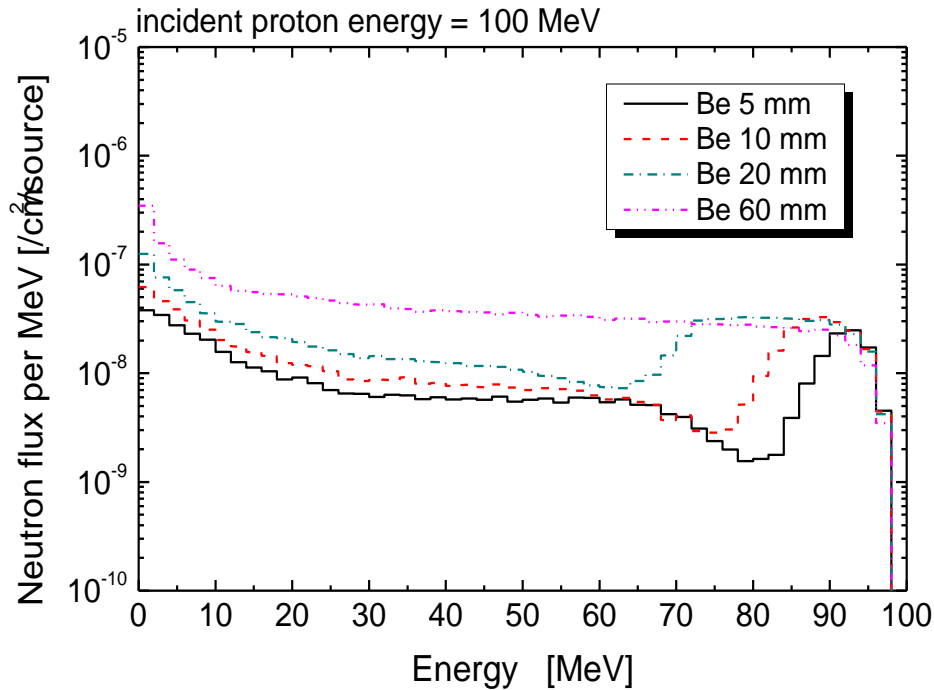
次に、ターゲット厚を変更することによって、検出器内に入射する中性子スペクトルがどのように変化するかについての評価を行った。ターゲット材料にはタングステンとベリリウムの2つを用いることとした。その理由としては、タングステン、鉛、ビスマスのような重核種ターゲットから発生する中性子のスペクトルはどのターゲットの場合でも非常に近い形状をしている上に、タングstenは最も中性子の発生量が高いからである。一方、軽核種についてみると発生中性子のスペクトルが類似しており、発生量についてはベリリウムがリチウムよりも大きいためである。ターゲットの厚みは、タングstenが5、10 mm、ベリリウムが5、10、20、60 mmと変化させて計算を行った。なお、SRIMを用いて100 MeV陽子に対するタングstenとベリリウムの飛程を計算したところ、タングstenが8.09 mm、ベリリウムが50.87 mmであった。第13図にタングsten、第14図にベリリウムのターゲット厚を変えた場合の中性子スペクトルの比較した結果をそれぞれ示す。その結果、タ

ングステンはターゲットの厚みを陽子の飛程よりも短くしても中性子スペクトル形状は変化せず、ターゲット厚を変化したによる影響は現れないことが判った。一方、ベリリウムターゲットは陽子の飛程よりも短くした場合には、中性子発生量が減少し、90 MeV 付近にピークを持つようなスペクトル形状になることが判った。

陽子のような荷電粒子は、完全に停止する際に最もエネルギーを付与するため、入射陽子がターゲットを突き抜けてしまうと、入射エネルギーの殆どを付与せずにターゲットを突き抜けてしまうため、通常、ターゲットの厚さは入射陽子の飛程よりも大きなものを用いて、陽子を完全に停止させるサイズにする。しかし、ベリリウムのような軽核種の場合、ターゲットの厚みを薄くすればするほど、前方方向の中性子スペクトルは、高エネルギーに中性子束のピークを持つスペクトルになった。しかし、ターゲット厚を薄くすると、全てのエネルギーにおいて中性子束が減少しており、中性子発生量が低下している。さらに、入射陽子の突き抜けにより、ビームライン周辺だけでなく、陽子との反応により周囲を放射化してしまうという問題点が考えられる。そこで、上記のようなベリリウムが持つ優れた特徴を生かしつつ、中性子発生量の低さと、陽子の透過による問題が生じないような、新しいターゲットを考案することにした。



第13図 Wターゲットから発生する中性子スペクトル



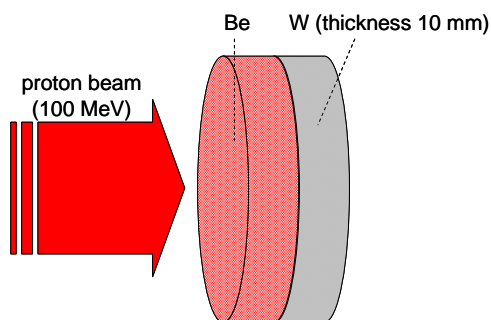
第14図 Be ターゲットから発生する中性子スペクトル

ADS のターゲットとしては中性子発生量と中性子スペクトルについて考える必要がある。ベリリウムについてみると第14図 に示す用に高エネルギーの中性子は発生するものの、入射陽子を完全に停止させたとしても、発生する中性子量は重核種に比べ低いという問題がある。そこでベリリウムとタングステンを組み合わせた複合ターゲットを提案した。これは発生量の観点から、ターゲット材料はタングステンが優れており、中性子エネルギーの観点では、ベリリウムが材料として最も相応しいからである。また、これらの材料は融点、熱伝導率が共に高く耐熱特性に優れている。

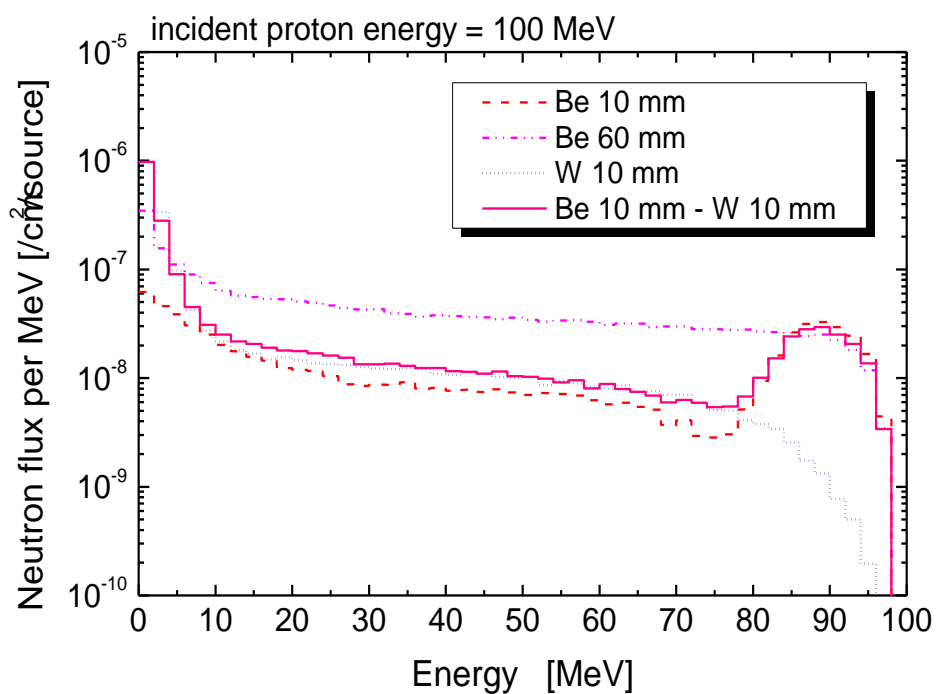
複合ターゲットの概念は、まず陽子の突き抜けが容易に起こる範囲内で厚みを調整したベリリウムターゲットに陽子ビームを入射させ、前方へ高エネルギー中性子を発生させる。そして、ベリリウムを突き抜けた陽子ビームをタングステンターゲットへ入射させ、大量の中性子を発生させるものである(第15図)。その際、タングステンターゲットの厚みは、入射陽子が完全に停止する大きさとする。通常、ベリリウムターゲットを用いる場合、ターゲット厚は陽子の飛程よりも少し薄いものが用いられる。その理由は、陽子をターゲット内で完全に停止させてしまうと、ターゲット内に水素が蓄積し、膨張することを避けるためである。この点からも、ベリリウム-タングステンターゲットは有用であると考えられる。

第16図にベリリウム 10 mm 厚、タングステン 10 mm 厚のターゲットと複合ターゲットから発生する中性子のスペクトルを比較したものを示す。複合ターゲットのスペクトル形状は、前節で述べた各ターゲットのスペクトルを重ね合わせたような形状となっており、0 ~ 75 MeV まではタングステンターゲットのスペクトル、75 MeV 以上はベリリウムターゲットのスペクトルとなっていることが判る。また、それぞれの中性子発生量を表2に示す。中性子の発生量は、タングステンターゲットのみの場合が最も高く、次いで複合ターゲット、ベリリウムターゲットの順となる。しかし、複合ターゲットはベリリウムのみには比べ5

倍以上程度の中性子発生量を得ることができることから、FFAG と KUCA を組み合わせた今後の ADS 実験においても利用することができると考えられる。



第 1 5 図 複合ターゲット概念図



第 1 6 図 Be、W 及び Be-W 複合ターゲットから発生する中性子スペクトル

表 2 Be、W 及び Be-W 複合ターゲット特性

Target material	Thickness [mm]	Neutron yield [cm ² /source]	Relative error
Be	10	1.05E-03	0.21%
Be	60	2.41E-03	0.10%
W	10	5.81E-03	0.08%
Bi and W	10 + 10	5.27E-03	0.08%

4. 3 中性子源として用いる ADS の設計

ADS を設置する際には、法的に原子炉施設として考えるか否かが最も重要な検討項目となる。研究用原子炉と同様に原子炉施設として取り扱った場合には以下のような長所と短所がある。

長所

- ・ 臨界に非常に近い未臨界状態（例えば実効増倍率が 0.99）でも運転が可能で炉心での大幅な中性子増倍が期待できる。さらに臨界とすることができれば炉特性を予め正確に測定することで運転中の未臨界度管理の精度を大幅に向上させることができる
- ・ 設置を審査する上で法律体系が既に整っている

短所

- ・ 設置申請書において臨界を超えた場合の事故想定も行なう必要があるため、そのための安全設備を整える必要がある
- ・ 加速器施設と原子炉施設とを切り離して考えることが難しい
- ・ 設置および施設の変更のために設工認申請書のような複雑な手続きが必要となる

上記の短所を考えると KUR のような研究用原子炉を中性子源として用いる場合と比較したとき、ADS を中性子源として設置することの利点はほとんど見いだすことができない。

一方、ADS を原子炉施設ではなく核燃料施設として設置した場合（設置することができた場合）、上記の短所を避けることができる可能性があるが、実際には様々な問題があると考えられる。

- ・ 核燃料施設の設計審査基準として「実効増倍率が計算誤差を考慮しても 0.95 を上回らないこと」となっているため、ADS を核燃料施設としたとき、設計誤差として 1% を見込んだとすると設計上の実効増倍率は約 0.94 以下とする必要がある。そのため、加速器からの発生中性子量に対する炉心内での中性子の増倍は最大でも $1/(1-0.94)=16.6$ 倍しか望むことができない。
- ・ 法律上の原子炉の定義は「核燃料物質を燃料として使用する装置で、原子核分裂の連鎖反応を制御することができ、かつ、その反応の平衡状態を中性子源を用いることな持続することができ、又は持続するおそれのある装置」となっているが、この「～持続するおそれのある装置」と言い切るには設計上の工夫などが必要と思われる。
- ・ 核燃料施設の審査指針では、もともと核燃料からエネルギーを取り出すことを想定しておらず、ADS の設置のためには新しい審査指針を整備することが必要となるかもしれない。さらにその整備の課程で ADS が原子炉施設に近い施設と認定され原子炉の審査指針に近い指針が作成された場合 ADS の利点が少なくなってしまう恐れがある。

このように ADS の設置に至るまでには様々な問題が生ずると考えられるが、現時点で現実的に中性子源として設置できそうな ADS として以下のような仕様のものを検討した。

- ① 燃料としては天然ウランを用いる。これは濃縮ウランに比べて入手が容易であること、および法的な手続きが簡単であるためである。また、燃料の形状としては金属または酸化物の棒状燃料を考える。これは酸化物ウランの棒状燃料は発電所において十分な実績を有していること、酸化物棒状燃料は高速炉の開発において使用実績があることである。なお、棒状燃料の被覆管にはアルミニウム合金を用いる。
- ② 減速材としては軽水を使用する。また外側反射体としては黒鉛を使用するが、これは炉心外部の中性子照射領域を広く取るためである。

- ③ 炉心は直径 1.0～1.5m、高さ 1.5～2m のアルミニウム製のタンク内に設置し、炉心内の格子板に燃料棒を立てて炉心を構成する。格子板は取り替えることができる構造とし、格子板を取り替えることで異なった中性子スペクトルの炉心を作成することができるものとする。なお、炉心の出力を監視するために炉心タンク内に複数の中性子検出器を設置する。
- ④ 炉心出力は数十 kW 以下とする。
- ⑤ 炉心中心に加速器からのビームを導き、炉心内に加速器ターゲットを設置して中性子を発生する。
- ⑥ ターゲット周辺には強制冷却ラインを設置して冷却を行なう。
- ⑦ 中性子実効増倍率は安全上の余裕を見込んで 0.9 以下とする。
- ⑧ 制御棒、制御系は設置しないが、緊急時は炉心タンクから軽水を別のタンクにダンプすることができるようにする。
- ⑨ 炉心内に中性子照射設備を設置し、圧気輸送管または手動で外部から照射物を出し入れできるようにする。中性子束が強い場合にはビーム取り出し孔を設ける。
- ⑩ 放射線遮蔽としては、炉心タンク周辺および炉心タンク上部にコンクリートの遮蔽体を設置する。
- ⑪ 建屋は中性子と γ 線の遮蔽機能を有する部屋とするが、事故時の放射性物質の閉じ込め機能は基本的には不要とする。

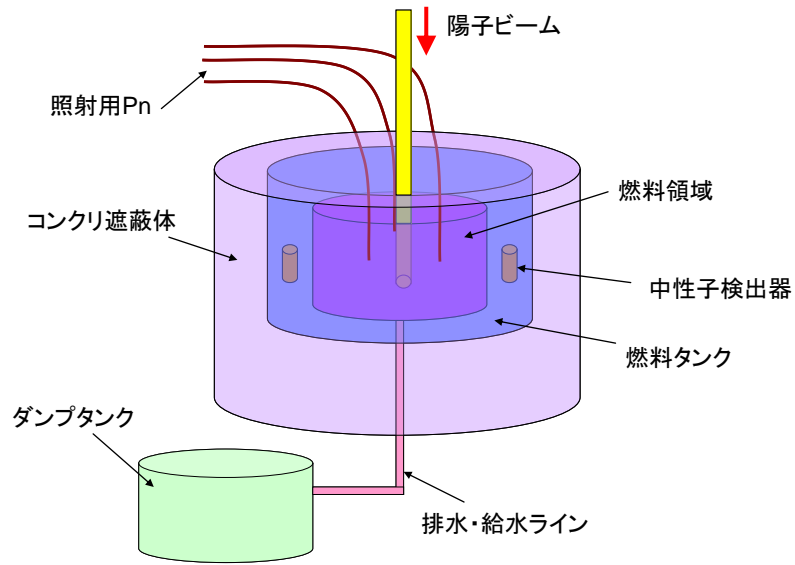
以上の仕様に基づく体系の概念図を第 17 図に示す。このような仕様の元で解析を行った。陽子ビームは炉心中央に導き、中性子発生量は現在の医療用サイクロトロンで実現している 10^{14} n/sec (ターゲット材料はベリリウム) を用いた。計算の結果、以下のような設計が好ましいことが判った。

- ・ 燃料領域を 2 つに分割し、中央のビームに近い領域を減速材が少ない高速スペクトル領域、外側に減速過多の熱中性子スペクトル領域とする。
- ・ 直径 5cm の加速器ビームラインは炉心上部より導入し、ターゲットは内側炉心の高さ方向中央部に設置する。
- ・ 燃料棒としてはウラン密度を高くすることができる金属ウランを用い、燃料棒のサイズは PWR 用燃料の約 2 倍の直径 2.0cm とする。内側は燃料棒を数ミリ間隔のほぼ密接した状態で配置し、外側には内側と同じ燃料を用い、 V_m/V_f 比で約 1.8 で燃料棒を配置する。
- ・ 内側燃料と外側燃料の間に幅 5cm で高さ 10cm の円環状の軽水領域 (軽水トラップ領域) を設け、そこに中性子照射設備を設ける。
- ・ 内側炉心の半径は 5cm とし、外側炉心の半径は 60cm、燃料領域の高さは 100cm とする。

この体系の性能等は下記の通りである。

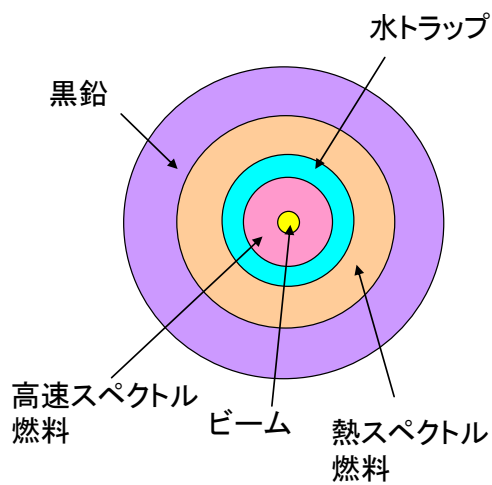
- ・ 実効増倍率は 0.86
- ・ 使用する金属ウラン量は約 1.5 t。
- ・ 炉心出力は 15 kW
- ・ 熱中性子束分布を半径方向に見ると、炉心中心付近では約 1×10^{11} (n/cm²/sec) で、軽水トラップ領域で最大値、約 4.8×10^{11} (n/cm²/sec) となり、外側燃料領域において約 0.8×10^{11} (n/cm²/sec) となる。

以上の設計において、約 5×10^{11} (n/cm²/sec) の中性子照射場を持つ ADS 中性子源であれば現実的に実現可能であることが判った。今後はさらに検討を行い、より性能を向上させた ADS 中性子源の設計を行いたいと考える。

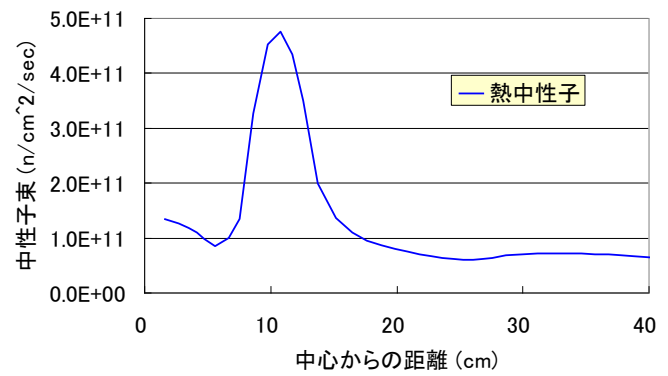


1

第17図 ADS中性子源の概念図



第18図 炉心の水平断面図

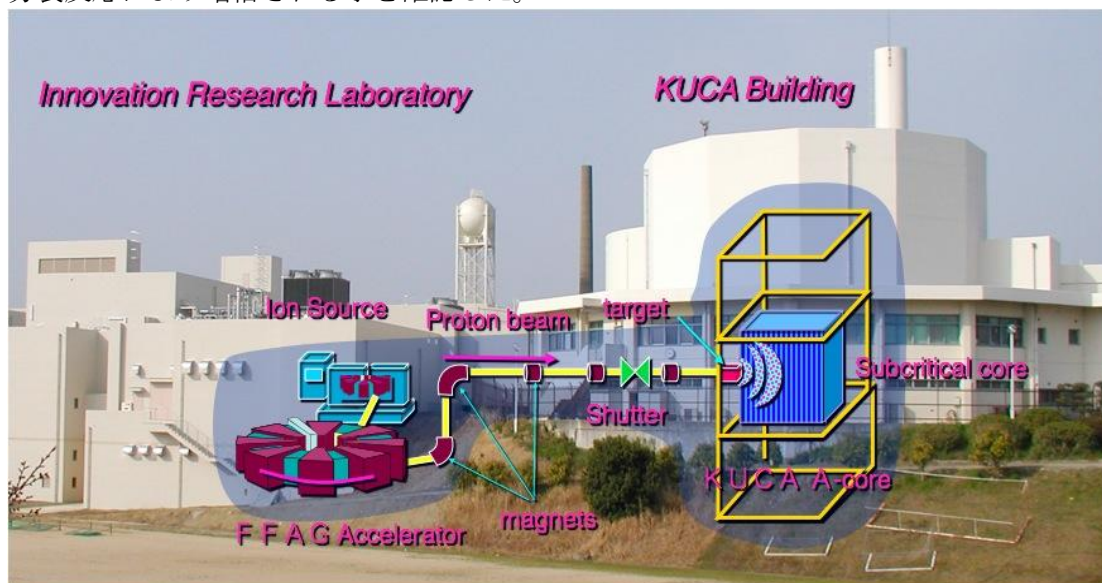


第19図 半径方向中性子束分布

5. FFAG の現状と今後の開発見通し（石）

5. 1 はじめに

現在京大原子炉に設置されている 150 MeV FFAG 加速器複合系は、2002 年度文部科学省「革新的原子力システム技術開発」提案公募事業で採用された「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」の一環として建設された。2008 年度には KUCA と結合し（第 20 図）、世界初の加速器駆動未臨界炉実験をウラン燃料体系を用いて行い、また 2009 年度にはトリウム燃料体系を用いて同様の実験を行った。ウラン燃料体系においては、タングステンターゲットに加速器からの陽子ビームを照射することで生じる核破砕中性子が核分裂反応により増倍される事を確認した。



第 20 図 加速器駆動未臨界炉実験装置。イノベーションリサーチラボに設置された FFAG 加速器と KUCA A 架台を結合させ、100 MeV まで加速した陽子ビームを A 架台に設置されたタングステンターゲットに照射した。

KUCA における炉物理研究のためには FFAG のビーム強度を 2009 年度の実験時（ターゲットでのビーム強度 $\sim 30\text{pA}$ ）の数十倍増強することが要求されている。さらに、パルス中性子源として FFAG 加速器を用いる場合、平均ビーム強度は $1\mu\text{A}$ 程度必要となる。ここでは、これまでの FFAG 加速器複合系の開発の経緯と現状、さらにマイクロアンペア級のビーム増強に向けた開発計画とその見通しについて述べる。

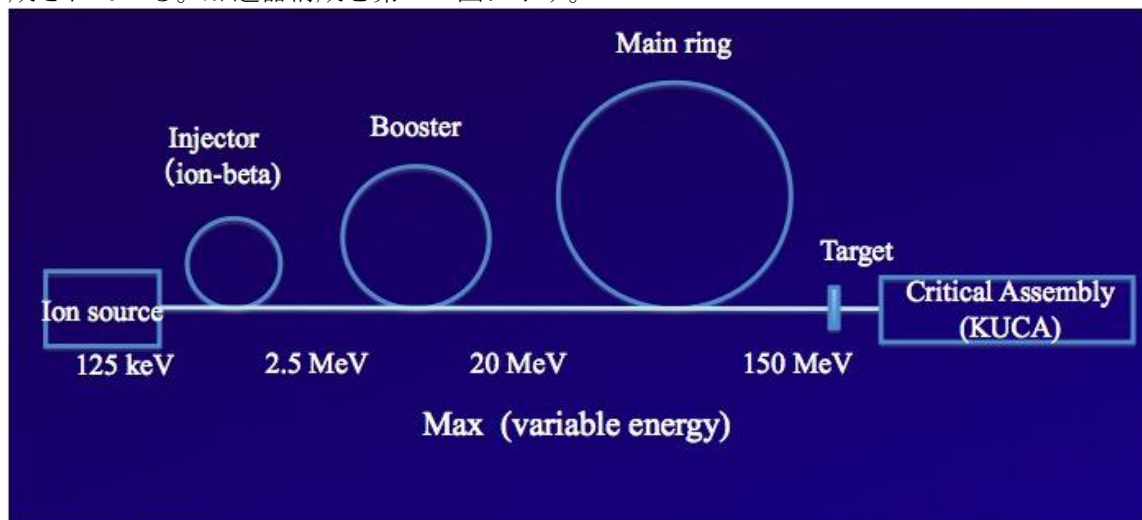
5. 2 開発の経緯と加速器の現状

FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) とは円形加速器における集束方式を表しており、時間的に磁場が一定で、ビーム進行方向に関して水平および垂直方向の磁場勾配が交互に符号をかえて変化する様な磁場分布を持つリングを FFAG リングと呼ぶ。磁場勾配が交互にプラスとマイナスを繰り返すことで、ビームは集束と発散を交互に経験し (AG フォーカス)、より強い集束を得る事ができる。FFAG の歴史は古く、シンクロトロンにおける強集束 (AG 集束) の原理が発見された直後、1950 年代に日本の大河千尋により発見された。その後、原理実証器が電子リングで作られたが、磁極形状の加工が困難なことや、長さの短い直線部に挿入可能な加速空洞の実現が困難なことから、実用機の開発は長年にわたり行われなかった。ところが 1990 年代に入り、広帯域で高いインピーダンスを持つ磁性体が加速空洞に実用可能となると、KEK において大強度陽子加速器としての FFAG 加速器の研究開発が始まった。2000 年には陽子 FFAG の原理実証器が製作され、2002 年に初の陽子実用

機である 150 MeV 陽子 FFAG シンクロトロンが同じく KEK で製作された。KURRI の FFAG 加速器複合系はこの KEK における 150 MeV FFAG に続き 2 機目の陽子 FFAG 実用機である。

FFAG は磁場が一定であるため、運転繰り返しを高くすることが可能である。通常のシンクロトロンの場合、運転繰り返しは 1Hz 程度で、特殊な高繰り返しシンクロトロンでも電磁石の鉄損を考慮すると 30Hz 程度が限界である。一方 FFAG では、KEK において 100Hz での運転実績があり、加速空洞のパワーアップをはかることにより 1kHz 程度の繰り返し運転も可能と考えられている。このため、FFAG シンクロトロンは通常のシンクロトロンに比べ大電流を供給できる。また、AG フォーカスにより、サイクロトロンに比べ容易に加速エネルギーを高くすることが可能である。一般にシンクロトロンは高エネルギーには向くが大強度には不向きで、それとは逆にサイクロトロンは大強度は得意だが高エネルギーは苦手とされるが、FFAG はその両方の長所を兼ね備え、高エネルギーかつ大電流ビームを供給できる加速器である。加速器駆動未臨界炉実験には高エネルギーの大強度陽子ビームが必要となること、またエネルギー可変性が必要となる事から FFAG 加速器が選定された。

KURRI の FFAG 加速器複合系はイオン源、イオンベータ、ブースター、主リングから構成されている。加速器構成を第 2 1 図に示す。



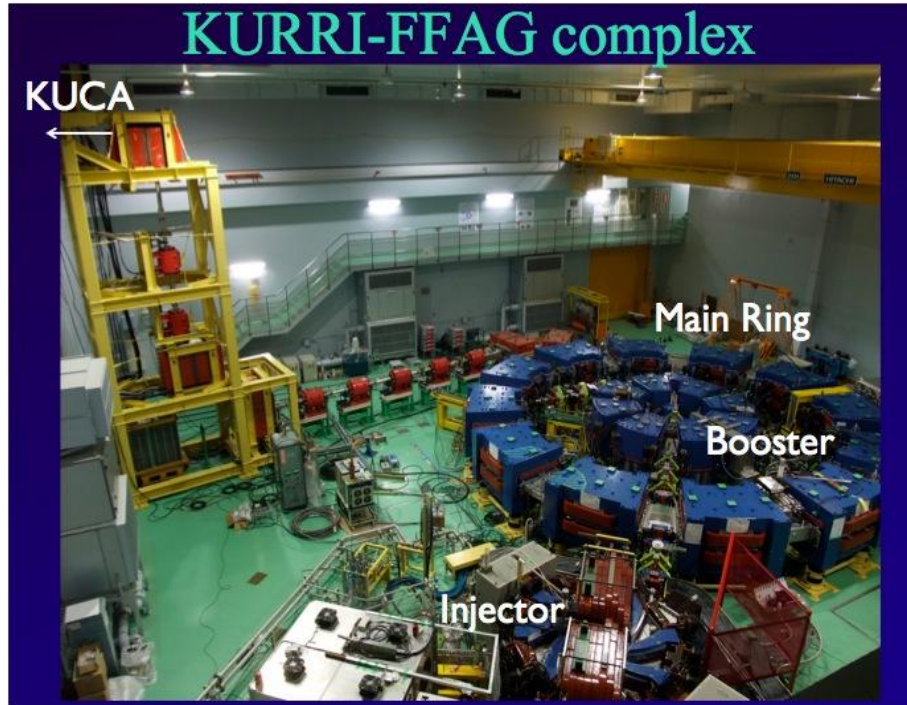
第 2 1 図 FFAG 加速器複合系の構成図

また、イオンベータ、ブースター、主リングそれぞれの基本仕様を表 3 に示す。

表 3 リングの基本パラメーター

	イオンベータ	ブースター	主リング
ラティス	スパイラル (8セル)	DFD ラディアル (8セル)	DFD ラディアル (12セル)
加速方式	誘導加速	高周波加速	高周波加速
k 値	2.5 (可変)	2.5	7.5
取り出しエネルギー	1.5 MeV (2.5 MeV)	11 MeV (20 MeV)	100 MeV (150 MeV)
平均軌道半径	0.60 - 0.99 m	1.42 - 1.71 m	4.54 - 5.12 m

第22図は加速器複合系の全体である。イオン源で生成された陽子ビームはイオンベータ、ブースター、主リングと3段階に加速される。これら3つのリングにはすべてFFAG集束系を用いている。



第22図 加速器複合系。イオンベータ、ブースター、主リングの3つのFFAGリングから構成される。

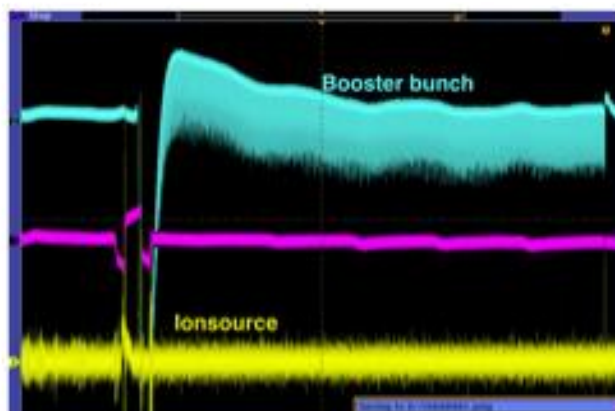
イオンベータ

イオンベータはスパイラル・誘導加速・マルチコイルによる可変 k 値の実現の3つの特徴を持つ。これらの試みは陽子FFAGリングとしては世界初である。スパイラル集束系は設計通りの性能が得られ、マルチコイルを独立に励磁して k 値を可変にする事でエネルギー可変性の実現も検証する事ができた。今回の設計・製作を通して取得したノウハウは今後のスパイラルFFAGリングの開発に有用である。また、小型リングには高周波空洞の設置が困難なことから、イオンベータでは誘導加速方式を採用した。加速は成功したものの、誘導加速方式では取出しビームのエネルギーの揺らぎが大きいため、ブースターへの入射の安定性に欠けるという欠点も明らかになった。

ブースター

ブースターは完成度の高いマシンと言って良い。ビームコミッションングにおいても、高周波捕獲から加速終了まで僅か数時間しか要しなかった。基本的なマシン特性はほぼ設計通りの値を実現しており、入射から取出しまでのビームロスもほとんど無い(第23図)。シンクロトロンやベータトロンの様な円形加速器では、進行方向に垂直な振動(ベータトロン振動)のリング1周当りの波数(ベータトロンチューンまたは単にチューン)がある条件を満たす時、共鳴現象が起こり、振幅が増大してビームロスが生じる。したがって、共鳴条件をさけたチューンを選び、加速過程でも大きく変動して共鳴条件に掛からない様にすることが要求される。ブースター基本設計にあたり、当時KEKにおいて蓄積されたノウハウを用いて磁極形状の詳細設計検討がなされたため、チューンの変動を最小限に抑える事ができた。通常の運転における調整については、イオンベータからのビームのエネル

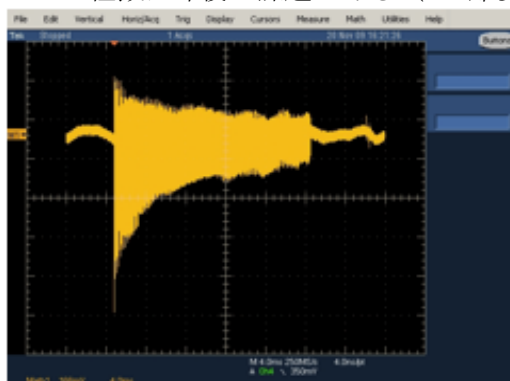
ギー変動に対応し、入射セプタム電磁石の励磁量を調整するなどの入射角の最適化が必要である。



第23図 ブースターにおける加速過程でのビーム強度の変化。水色はバンチモニターの波形。加速過程での顕著なビームロスはない。

主リング

主リングのビーム調整は周回軌道にのせることが最初にして最大の難関であった。入射されたビームが1周は周回するものの、2周目が確認できないという状態が1年以上も続いた。原因は2つあり、主電磁石の直線部への漏れ磁場が大きい事と、入射セプタム電磁石（ビーム入射に用いる特殊電磁石。KURRIのFFAG複合系のなかでも最も難易度の高い電磁石のひとつである。）の架台が磁性を持つ鉄であったことである。主リングの主電磁石はヨークフリーという特殊な方式を採用している。主電磁石はDFDトリプレットと呼ばれる構造をもち、3つのポールが一つの鉄の構造体に据え付けられている。ヨークフリー方式では、Fポール部分のリターンヨークが無く、この部分のどこからでもビーム入射やビーム取出しが行えるというメリットがある。しかし一方で、Fポールで発生した磁束はリターンヨークがないため、構造体を介してDポールに磁場を発生させるが、その際、電磁石の側面を貫いて磁束が大きく直線部に漏れてしまうという欠点がある。それに加えて、直線部に設置された入射セプタム電磁石の架台が鉄であったため、この架台が漏洩磁場を吸収し上下の対称性を崩したことにより、ビームに垂直方向のキックを与えてビームロスを引き起こしていた。架台をステンレスに替えることでこの問題を解決し、ビームを周回させる事ができた。入射に続く加速・取出しでは、KEKでの経験を反映し、比較的順調に調整することができた。しかしながら、第24図に見られる通り、いくつかのビームロスが観測されており、これらのロスの軽減は今後の課題である（5.3節参照）。



第24図 主リングにおける加速過程でのビーム強度の変化。黄色の信号はバンチモニターの波形。

CA へのビーム輸送系

2009 年度に行った CA 実験時のビーム強度は、主リング取出し直後で放射線規制値の 100pA を達成したが、CA ターゲットでのビーム強度は 30pA にとどまっている。これはターゲットまでの輸送ラインでビームロスをしているためであるが、CA 炉室内に集束系が設置できなかったことで最適な光学系が組めなかったことが主な原因である。2009 年度実験後には炉室内に四極電磁石を設置したため、今後この輸送効率も改善することが期待される。

劇的な改善を目指して

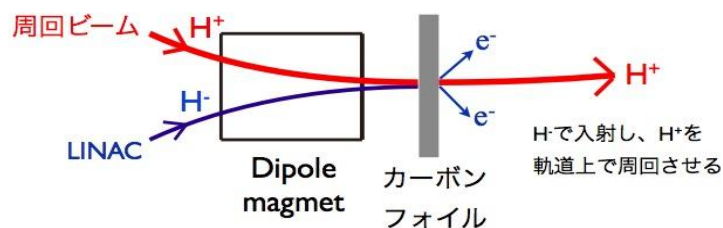
ブースターリングは先に述べた通り、ほぼ設計通りの性能に達している。従って、今後主リング及びその下流のビーム輸送系で改善が行われたとしても、高々 nA オーダまでの増強が期待できる程度である。今後、詳細な加速器駆動未臨界炉システムの研究や、パルス中性子源の開発のためには μA オーダの増強が必要となってくる。そこで、現行のイオンベータ+ブースターのインジェクターシステムを Linac に変更し H ビームの荷電変換入射を行う事により、 μA オーダに向けたビーム増強が進行中である。

5. 2 H ビーム荷電変換入射によるビーム大増強計画

H 入射の利点

はじめに H ビーム荷電変換入射の概要について述べる。リングに蓄積される電荷量はその前段のインジェクターからのビームのピーク電流とパルス幅によって決まる。入射粒子が周回粒子と同じ電荷を持ち、インジェクターのパルス幅が入射エネルギーでのリング内ビーム周回時間よりも長い場合、マルチターン入射とよばれる方法を用いて、リングに複数周回分のパルスを入射させることで蓄積電荷量を稼ぐことができる。入射されて周回をはじめるビームと入射機器の干渉をさけるため、周回軌道を時間的に横方向（通常水平方向）に移動させながら複数ターン入射する。そのため、入射ターン数を増やすとビームサイズが増大するという欠点もあり、ハードウェアが制限するアパーチャ以上は入射できない。KURRI ブースター-FFAG の場合、イオンベータからの入射ターン数は 14 ターン程度で、それ以上の入射はビームサイズが大きくなりビーム取出しが困難になる。

H 荷電変換入射は第 25 図のように周回軌道上に荷電変換フォイルを設置し、フォイル上流の電磁石（複数あっても良い）を周回ビームと入射ビームが通過する様にしておく。陽子と 2 個の電子からなる H ビームはマイナスの電荷をもつため、これらの電磁石では周回軌道と反対の曲率で曲げられ、フォイルの位置で周回軌道と合流し、電子 2 個がはぎ取られて陽子に変換され、所定の周回軌道に乗る。この入射方式では周回軌道と入射機器の干渉がないので、入射ビームは周回軌道の中心付近に打ち込む事が可能となり、マルチターン入射の場合のようなビームサイズの増大はない。



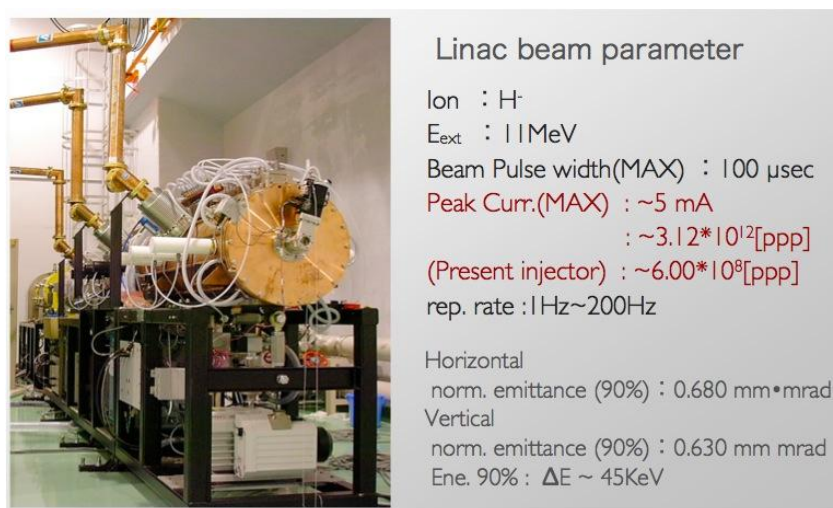
- ・ LINACからH⁻を入射
- ・ カーボンフォイルでH⁻をH⁺に荷電変換させる
- ・ MAIN RINGでH⁺を加速させる

第 25 図 荷電変換入射

しかしながら、フォイルとビームが衝突する事による発熱と多重散乱のためのビームサイズの増大等の問題がある。これらにより入射ターン数（パルス幅）は制限されるが、KURRI-FFAG 主リングへの入射ターン数は 160 ターン程度を想定しており、ブースターでの 14 ターンに比べ、一桁以上入射ターン数を大きくとることができる。入射ターン数の増大に加え、入射器のピーク電流も高くなる。現在のイオンベータからのピーク電流が $25\mu\text{A}$ であるのに対し、H-Linac は 200 倍の 5mA のピーク電流が可能である。以上に述べた様に、ピーク電流と入射時間の両方を増加させる事により、3 桁のビーム増強を計画している。

Linac

今回 H 入射に用いる Linac は ERIT リングの入射器としてイノベーションリサーチラボ 照射ホールに設置されているものを用いる。構成は RFQ と 2 段の DTL (DTL1, DTL2) からなり、主な仕様は、取出しエネルギー 11MeV 、ピーク電流 5mA 、パルス幅 $100\mu\text{s}$ 、運転繰り返し $1\text{--}200\text{Hz}$ である。

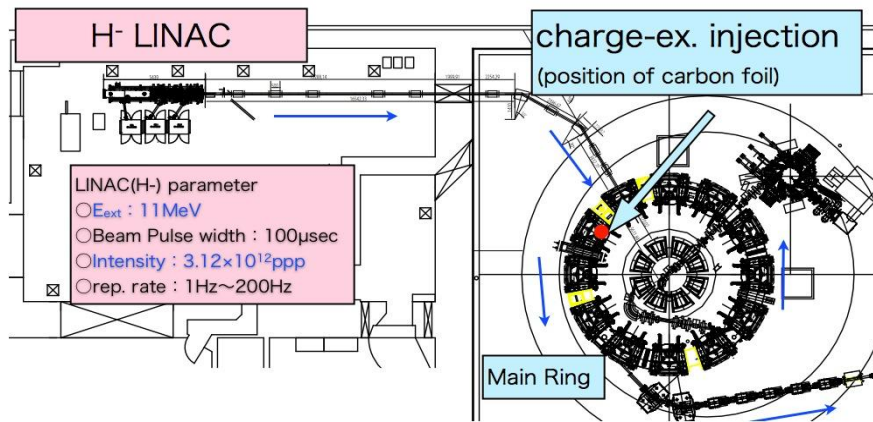


第 2 6 図 ERIT 入射用 11MeV H Linac

ビームライン

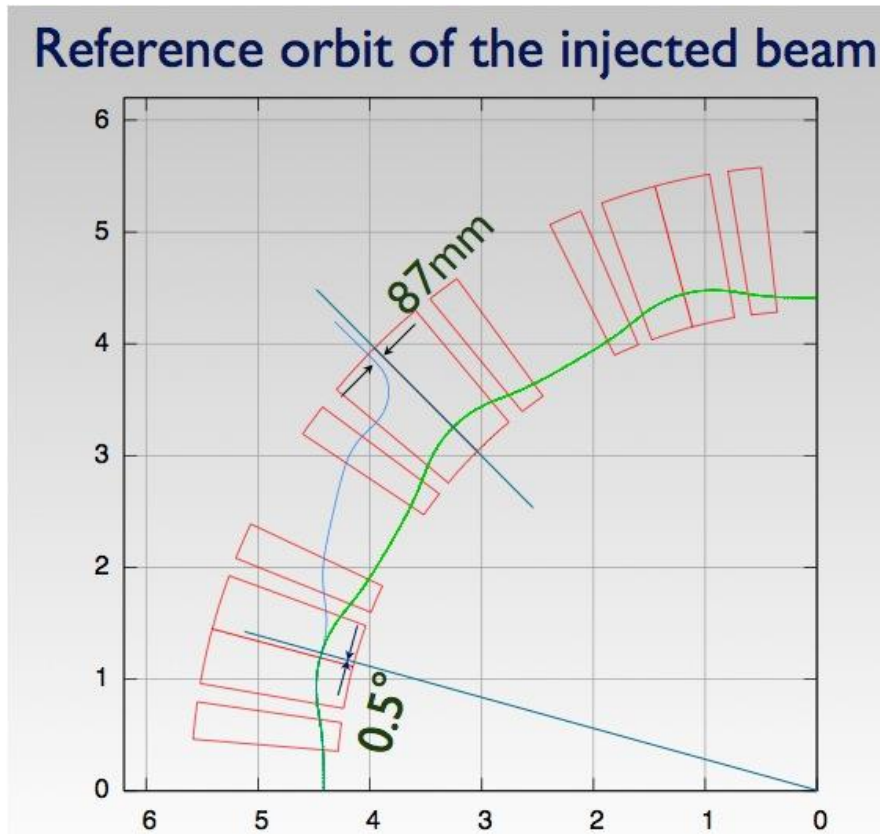
イノベーションラボ照射ホールは 150MeV FFAG 加速器複合系の設置されている実験装置室と 2m のコンクリート壁を隔て隣接しており、ビームの輸送が可能な貫通穴が設けられている。輸送ビームラインはこの貫通穴を通り、この穴から最短の位置にある主リングの主電磁石までビームを輸送する。

H- injection for FFAG accelerator at KURRI



第 27 図 H⁻ ビームライン

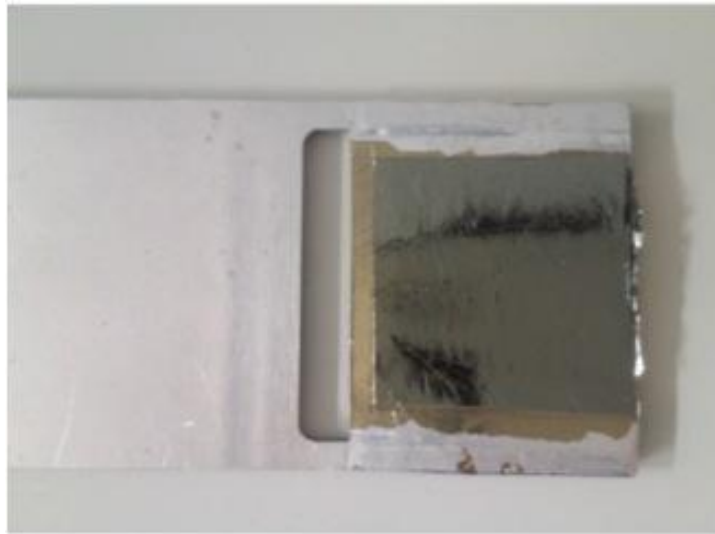
H⁻ビームは主電磁石の中央より 87mm 下流からほぼ中心に向かって入射され、1セル先の主電磁石の中心より 0.5°上流に設置されたフォイルで周回軌道と合流する（第 28 図）。



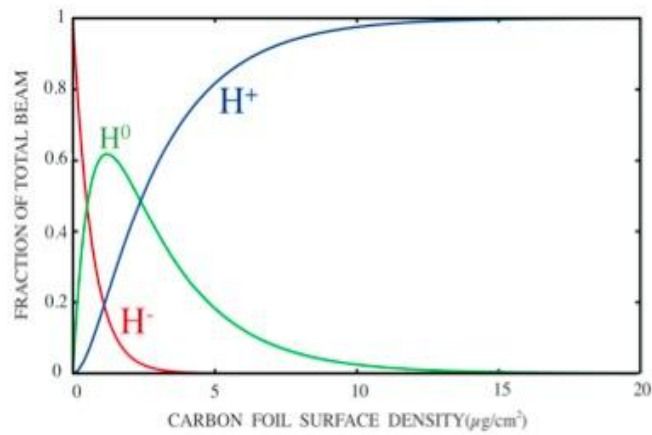
第 28 図 入射軌道詳細。青線は入射 H⁻ビーム、緑線は周回軌道を表す。ほぼ 1セル分の主電磁石を合流のために用いる。

荷電変換フォイル

荷電変換フォイルは厚み $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のカーボンフォイルを 2 枚重ねで用いる（第 29 図）。第 30 図にフォイルの厚みと $\text{H}^- \rightarrow \text{H}^+$ の変換効率を示す。これによると、 $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のフォイルではほぼ 100% の変換効率が見られる事が分かる。

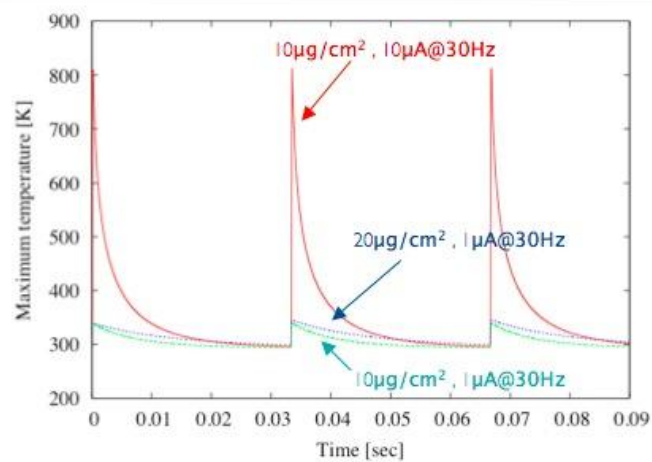


第29図 製作したカーボンフォイル。10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のフォイルを2枚重ねにしたもの。



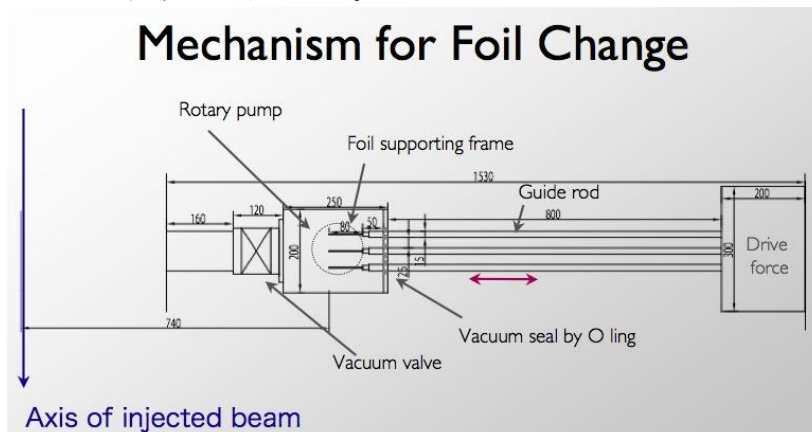
第30図 カーボンフォイルの厚みとH-ビームの変換効率の関係

フォイルのビームによる熱負荷を第31図に示す。フォイルの冷却は放射のみを考え強制冷却は無いが、30Hz 運転では次のビーム入射の前にフォイルは室温まで下がっていることが分かる。



第31図 フォイルのビームによる熱負荷

フォイルは定期的に交換する事を考慮し、3連装交換機構を採用する（第32図）。3枚までは運転中でも交換が可能である。3枚使い切った後でも、フォイルチェンバーは加速器本体とはゲート弁で仕切られ独立にロータリーポンプを備えているため、リングの真空を保ったままフォイル交換が可能である。



第32図 フォイル交換機構。3枚までは運転中の交換が可能である。

フォイルによるエネルギーロス $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の場合 760eV である。加速空洞のギャップ電圧が 4kV であれば、160ターンで 10mm 軌道が移動する。このため、フル入射時間の160ターン後でもビームサイズの増加は2-3倍程度である。

ビームライン整備

以上の検討から H 入射の実現性が検証されたため、ビームライン整備工事を行い、入射試験を開始した。第33図に整備されたビームラインを示す。



第33図 整備された H ビームライン

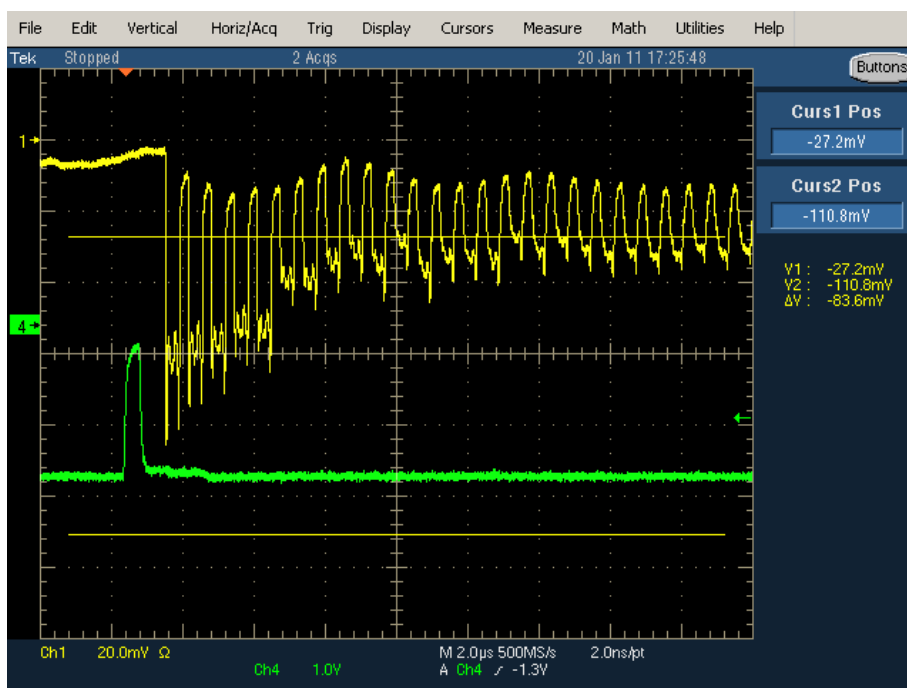
5. 3 今後の開発見通し

2011年1月中旬より、Linac からの H ビームを FFAg 主リングに入射し、 100MeV までの加速と取出しを行った。ここでは1月28日現在のビーム調整の結果を報告し、これに基づく今後の $1\mu\text{A}$ に向けたビーム増強の見通しについて述べる。

H 入射ビーム調整試験

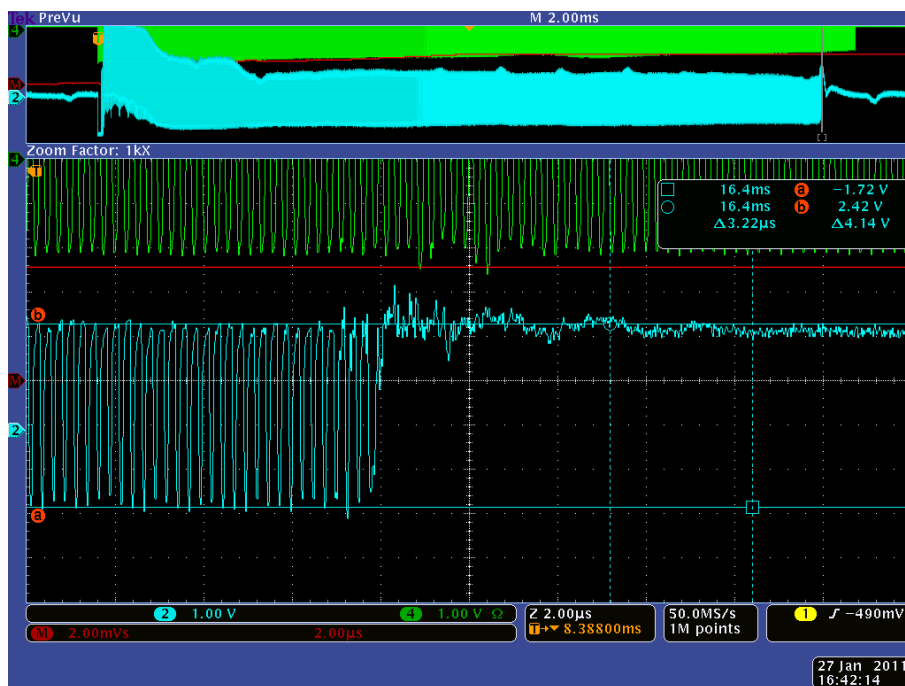
主リングの主電磁石とビームライン電磁石をほぼ設計値通りの値で励磁し、ビームを通したところ、ビームの周回がフォイルの内側に設置した蛍光板で観測された。その後、入射位置、角度の調整等を行い、バンチモニターで周回が確認された。第34図の黄色の線は

周回ビームのバンチモニターの信号である。このとき、イオン源からのビーム幅をリング周回時間 660ns より短い 200ns にチョップし、バンチモニターでターンごとのパルス信号が観測できる様にしている。入射後 20 ターン程度までは、ビームロスが観測されているが、これは入射位置 and/or 角度のミスマッチがあり、ビームが物理的に削られているためであると考えられる。今後詳細な入射スタディーにより、このロスは軽減されるものと期待される。



第3 4 図 バンチモニターの信号。入射後のターンごとのビーム強度を観測できる様に 200ns にチョップされたビームを入射し、バンチモニターで測定した。

入射されたビームが周回する事を確認した後、高周波加速空洞に電圧を印加し、高周波捕獲および加速を行った。第3 5 図の青線は入射から 100MeV まで加速する際のバンチモニターの信号を表している（緑は高周波電圧モニターの波形）。下図は上図のビーム取出し部分拡大図である。ビームバンチモニターの消失はキッカー電磁石励磁によりビームがとりだされたことによる。



第35図 バンチモニター（黄色）と高周波電圧モニター（緑）の信号。

2011年1月28日現在、100MeV ビームは取出し直後で 20Hz 運転換算で 1nA に到達している（実際には放射線規制値を超えない様に繰り返しを 10Hz に落として運転し 0.5nA を観測）。

ビーム増強に向けたロードマップ

H入射は当初の設計から大きく外れる事は無く、順調に調整が進められた。今後 1 μ A を目標とするビーム増強を実施する際、いくつかの技術的課題がある。現在見えているものを列挙する。

1. 入射効率の向上
2. 加速効率の向上
3. 取出し効率の向上
4. 空間電荷効果による電流制限の緩和
5. ベータトロン共鳴に起因するビームロスの軽減

表4にビーム増強のロードマップを示す。

表4 ビーム増強ロードマップ

年度	エネルギー	目標電流	解決すべき課題	方法	備考
2010	100MeV	1nA	-	-	達成済
2011	150MeV	10nA	入射効率の向上	入射調整	
			加速効率の向上	加速パターンのスタ ディー	
			取出し効率の向上	キッカー電磁石及び 電源の追加	キッカー電源新規製 作
2012	150MeV	0.1 - 1 μ A	空間電荷効果による 電流制限の緩和	繰り返しを上げる 100 Hz - 200 Hz	加速空洞の追加によ る高周波電圧の増強
			共鳴に起因するビー ムロスの軽減	磁場の詳細な補正	補正磁極、補正電源 の追加

入射効率の向上

第34図に見られる測定ではリング1周よりも短い幅のビームが入射されているため、周回ごとのビームの時間構造を知る事ができる。この測定から、入射後10ターン以内のビームロスが顕著であることが分かる。このロスは入射エラーによるものと考えられるため、今後の詳細なビーム入射軸の位置角度調整ならびにオプティクスマッチングで改善可能と考えられる。

加速効率の向上

現在用いている加速パターンは入射時からすでに周波数変調をかけており、入射ビームの運動量に対してアクセプタンスが最大となっていない。またビームがフォイルを通過する際の加速位相のずれを考慮していないため、バケツから取りこぼされる粒子が出てくると考えられる。ビームの縦方向の振動を詳細に測定・解析する事により、加速パターンの最適化を行えば、加速初期で取りこぼす粒子の数を減らすことができるものと期待される。

取出し効率の向上

2011年度には取出しエネルギーを100MeVから150MeVに上げることを計画している。現状のキッカー電磁石と電源システムでは、取出しキッカー電磁石の蹴り角は100MeV取出しの場合でもすでに上限に達しているため、150MeV取出しのためにはキッカー電磁石を現在の2台から4ないし6台に追加する必要がある。この場合、キッカー電磁石電源は現在の1台から2ないし3台に増強する必要がある。

空間電荷効果による電流制限の緩和

ビーム内部の電荷量が増えると、粒子同士の電荷による反発力で外部磁場や電場の集束効果を打ち消し、安定に周回・加速させることができなくなってしまう。したがって、一回のサイクルで加速できる電荷量は制限され、今回の150MeV FFAGリングの場合 3×10^{11} 個が上限と計算されている(Laslett tune shift $\Delta v < 0.3$ とした)。そのため、運転繰り返しを上げる事で、平均電流の増強を行う。運転繰り返し100Hzないし200Hzを実現するためには、現在用いている加速空洞および電源システムをもう1セット増設する必要がある。

共鳴に起因するビームロスの軽減

5.1 節で述べた様に、ベータトロンチューンが共鳴条件を満たすと、振幅が増大してビームロスを引き起こす。これを避けるため、ベータトロンチューンの安全な領域で運転する必要があるが、漏れ磁場の影響等でチューンが変動し、危険な領域に動いてしまう。現在は主電磁石の F コイルと D コイルの励磁量を調整する事でその影響を最小限にしているが、今後ビーム強度が上がって、小さなビームロスが問題になった場合、この共鳴の影響をさらに軽減しなくてはならない。方策は二つあり、チューンの変動をさらに押さえ込むための補正磁極を設置することと、軌道の対称性を確保するために軌道補正電源を追加する事である。これらの最適化のためには、チューン測定および軌道測定と同時に共鳴現象の詳細な解析が必要となる。

以上の技術的課題を解決することにより、エネルギー150MeV、平均電流 1 μ A のビーム供給を目指すものとする。

6. 新加速器中性子源の提案

6. 1 位置づけ (川端)

人類社会の持続的発展には原子力・放射線の利用が必要である。そのために「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」計画では、研究炉・加速器を用いる共同利用・共同研究を軸に、複合的な原子力科学の発展と有効利用に向けた先導的研究を推進し、その拠点を形成することを目的としている。

本計画を推進するためには、研究炉と加速器の両方についての利用計画が重要である。研究炉利用については、「KUR 利用活性化」として検討が進められている。しかし、使用済燃料問題等もあり、長期の KUR 利用については不透明であると言わざるを得ない。そのような状況下で、現在の共同利用・共同研究を確実に遂行するためには代替中性子源について検討する必要がある。

また、さらに現在行われている研究をさらに発展させる観点も必要である。FFAG は CA と組み合わせて ADS 研究を遂行しているが、来年度からさらに電圧・電流を増強して材料照射や熱工学応用実験を開始する予定である。さらに増強することにより、パルス中性子源として利用も可能となる。そうなれば、現在 KUR で行われている中性子ビーム実験をさらに発展させた中性子散乱実験が可能となる。

また、KUR で行われている中性子照射実験も、加速器を利用することにより、原子炉では得られない高エネルギー中性子による照射実験が可能となるし、さらには陽子線照射実験も可能である。この様に、中性子照射実験においても加速器を利用することによって、さらなる展開が可能である。

本検討においては、共同利用研究所としての使命を遂行するための、現在多くのユーザーをかかえる研究分野への配慮を行うばかりでなく、利用面での展開を可能とすべく、また大学付置研に相応しい規模の加速器中性子源の検討を行った。

6. 2 加速器の構成（石・谷垣）

6. 2. 1 前提条件

加速器の機種選定にあたり、中性子利用側からのビーム仕様ならびにコスト・製作期間・技術開発課題等の観点から、検討の前提となる条件を以下に述べる。中性子利用では、中性子束の時間構造は問わないが大強度を要求するユーザーグループと TOF 測定のために極めて短いパルスを要求するグループがあり、どちらのユーザの要求にも対応した中性子源を目指したい。そのため、加速器からのビーム（主に陽子）スペックとして、大電流モードでは mA オーダーの電流が要求される。また、Be 等のターゲットを用いる場合は 10～30MeV 程度のエネルギーを想定し、核破碎中性子発生のため W 等の重金属を用いる場合は～100MeV 以上のエネルギーが要求される。さらに、パルス中性子発生のためには、加速器のビーム電流は 1 μ A 程度以上あることが望ましく、ビームパルス幅は 1 μ s 程度以下であることが必須である。

計画全体の予算を考慮し、加速器・実験装置・建屋を合わせて初期コストを 60 億円程度と想定している。このため、加速器本体にかけられるコストは 20-30 億円を目標とする。また、ユーザのための実験開始を 5 年後には実現したい。以上の条件より、本計画では加速器そのものの開発が目的ではないことを踏まえ、既存の技術、若しくはその延長となる開発によってビーム性能を達成できる機種を選択するものとした。

6. 2. 2 想定される加速器

前提条件である諸条件を踏まえた場合、想定される加速器の構成は主に

0. 既存の ERIT 用 11 MeV Linac をベースとした構成
1. 既製品であるサイクロトロン
2. 既存の FFAG をベースとした構成

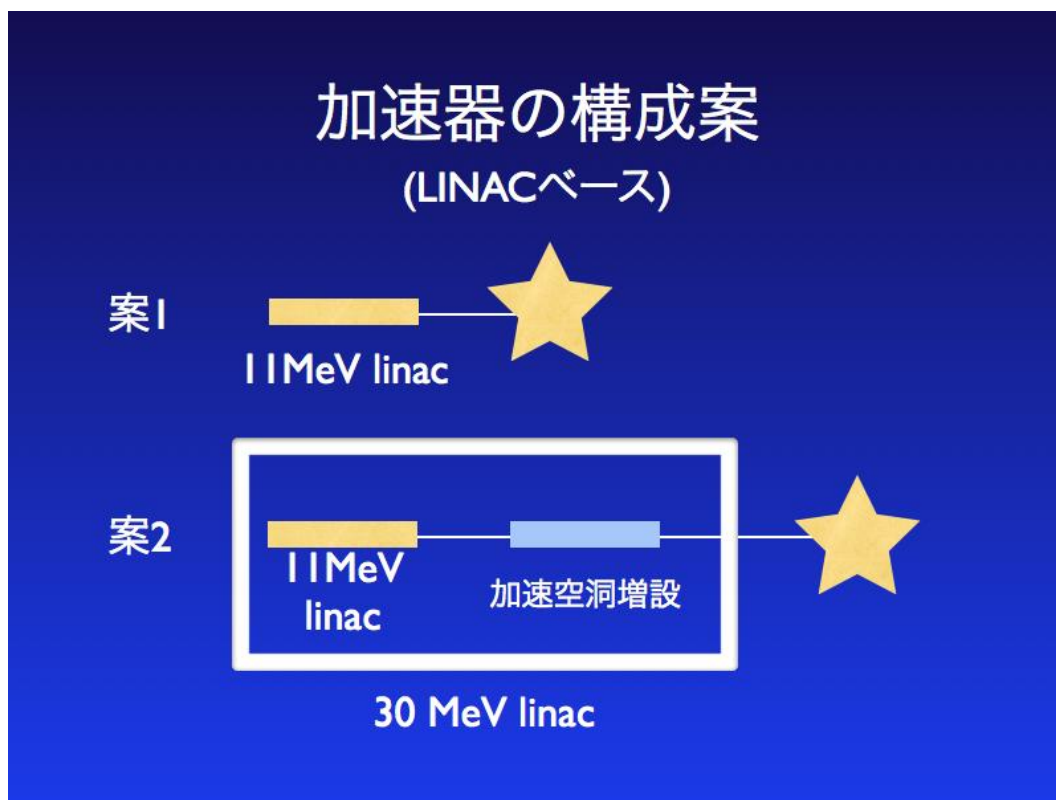
が考えられる。以下にそのあらましを説明する。

（案 1）11 MeV Linac

ERIT の為に作成された 11 MeV 陽子 Linac からのビームをターゲットに入射して中性子を発生させる。ターゲットは Be を想定。パルス幅 500 μ s、デューティが 10% のパルス運転で、イオン源の改良で目標電流は 5 mA（パルス内の平均電流は 50 mA）を想定している。H⁺と H⁻加速器はすでに建設済みで加速実績もある。

（案 2）30 MeV Linac

ERIT の為に作成された 11 MeV 陽子 Linac に、加速タンクを増設し 30 MeV までエネルギーを上げる。その他のパラメータは 11 MeV と同じ。エネルギーをあげる事で中性子の発生効率が上昇する。イノベーションラボの建家の大きさの限界、および開発要素が増えることから、これ以上の Linac による高エネルギー化は困難である。追加する加速タンクは 1 台あたり 4 MV であり、このタンクを ON/OFF することで加速エネルギーを 4 MeV ステップで変更可能である。



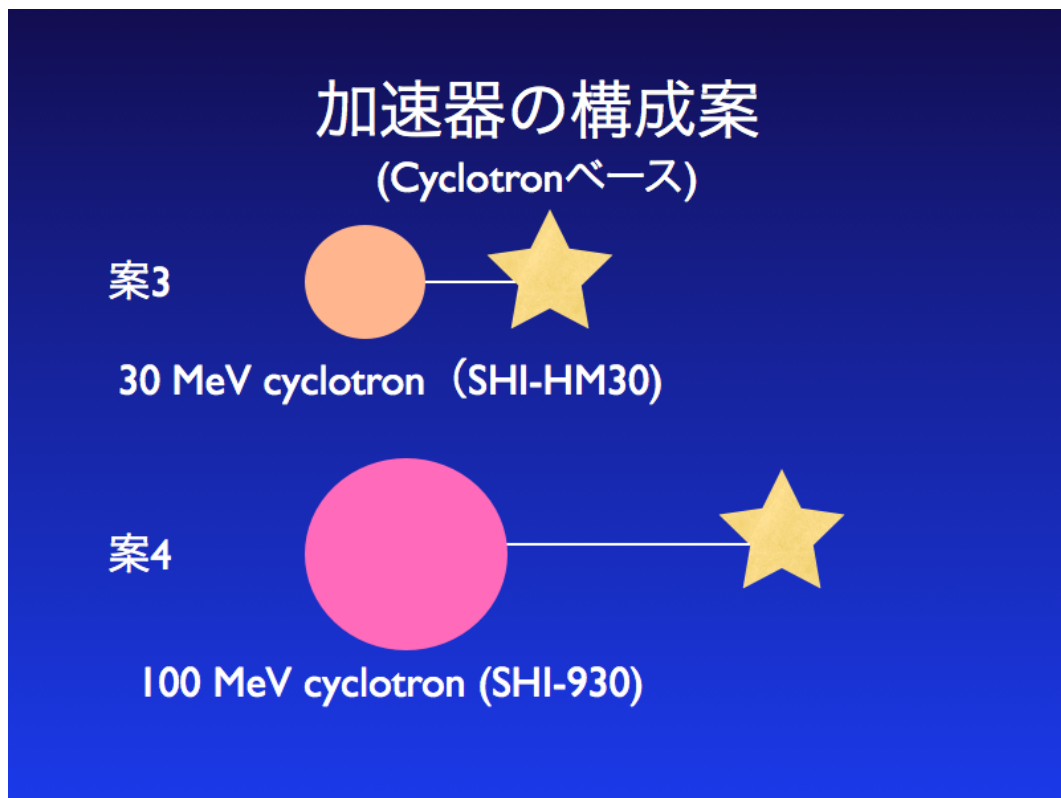
第36図 Linac をベースとした加速器の構成案

(案3) 30 MeV BNCT サイクロ(HM-30)

京大炉で開発中の BNCT 治療装置と同じスキームで中性子発生を行う。BNCT サイクロ用として京大炉に納品されている住友重機械の HM-30 と同型機を使って負イオン加速、フォイルによる荷電変換によるビーム取り出しのあと、Be ターゲットに入射して中性子を発生させる。DC ビームで目標 2 mA である。入射側でバンチャーを稼働させる事で ms オーダーのパルス化も可能だが、基本的に DC ビームであるため、パルス化で平均電流が下がる。またフォイル設置場所を変える事でわずかにエネルギーを変更する事もできるが、基本はエネルギー固定である。京大炉の BNCT では 30 MeV と 18 MeV のビーム取り出しが可能である。

(案4) K=110 MeV 930 サイクロ

住友重機械の市販品である汎用多目的サイクロを利用するもので、JAEA 高崎や東北大 CYRIC 他に納入実績のある 930 型が想定されている。930 型サイクロトロンは外部イオン源で陽イオン加速が基本設計であり、K 値は 110 MeV である。標準設計では陽子で 10~90 MeV、最大電流 50 μ A の取り出しが可能とされているが、東北大およびユバスキラ大（基本設計が共通のサイクロを保有している）で H⁺ 加速による 50 MeV 0.1 mA までの取り出し実績もある。今回は 50 MeV 0.5 mA (目標値) として Ta ターゲットに入射、中性子を発生させる。また、外部イオン源を整備する事で陽子だけでなく He、C、Ne、Xe といった重イオン加速も可能である。



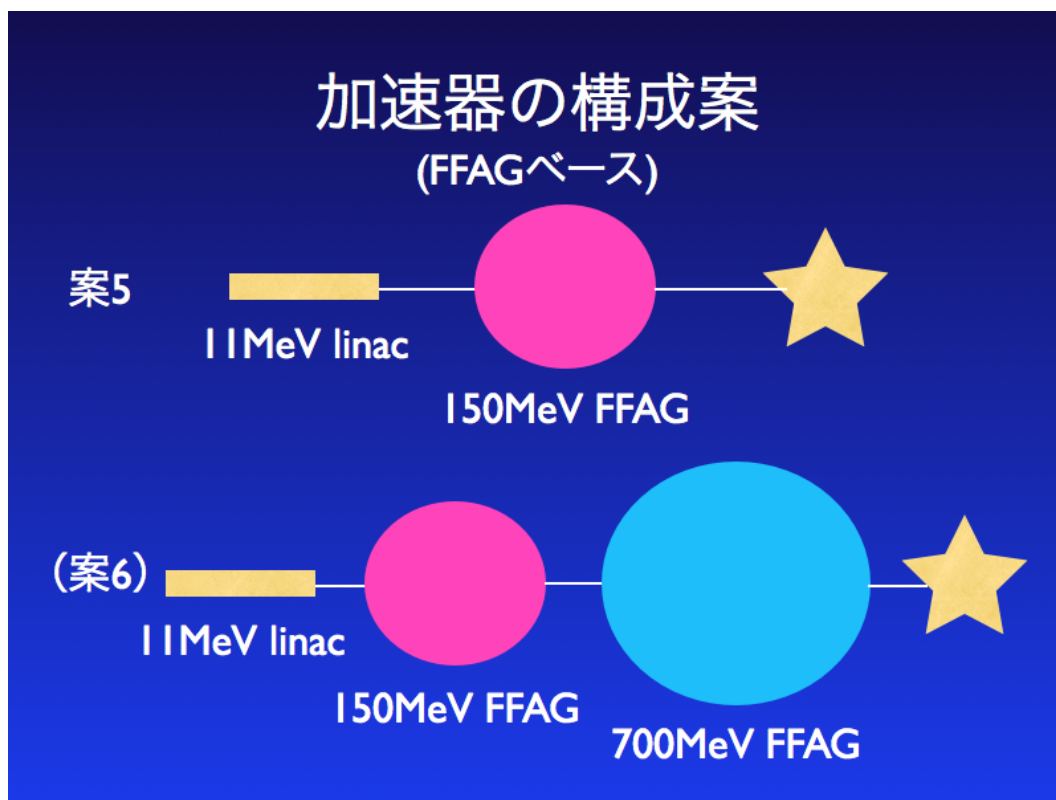
第37図 サイクロトロンをベースとした加速器の構成案

(案5) Linac + 150 MeV FFAG

案1ないし2のLinacを既存の150 MeV FFAGの入射器として利用するものである。これで得られた150 MeVの陽子ビームによる核破砕反応での中性子発生をめざす。LinacはH⁺加速を行い、FFAGで負イオン入射(チャージストリッパーによる荷電変換による入射)をおこなう。平均電流は案1~4に比べて見劣りするものの、FFAGのきわめて短い(数十ns幅)パルスビーム構造と~100 Hzの早い加速繰り返しの特徴から時間分解能の良いパルス中性子の発生が期待される。空間電荷効果緩和等の理由で、FFAGへの入射条件で有利なLinacは案2の30 MeVのほうが望ましい。2011年1月末の時点で既存の11 MeVのLinacで実証実験が始まっており、年度内に100 MeV 1 nA@KUCAを目標として作業が進んでいる(本報告書5章参照)。ただし、この案で目指している平均電流5 μAを実現するには、Linacでの大規模な電源増強などが必須である。

(案6) Linac + 150 MeV FFAG + 700 MeV FFAG

案5の構成の後段に将来700 MeV FFAGを建設し、ADSR用ドライバーとして使える加速器とするものである。700 MeV FFAG加速器自体が新規開発となるため、案5の将来的な発展形としての位置づけである。



第38図 Linac+FFAGの構成案

6. 2. 3 各方式の比較

各方式の特徴を比較したものをまとめる。FFAGはLinacを入射器とする前提なので、大きくLinacとサイクロに分類する事が可能である。さらに11 MeVと30 MeVのLinacの違いは加速タンクの増設の有無の違いである一方、サイクロのHM-30はH加速に特化する一方、930は汎用機であるため構成や性質が異なる。これらからLinac、陽子専用サイクロのHM-30、汎用機の代表として930についての比較を行う。

6. 2. 3. 1 エネルギー可変について

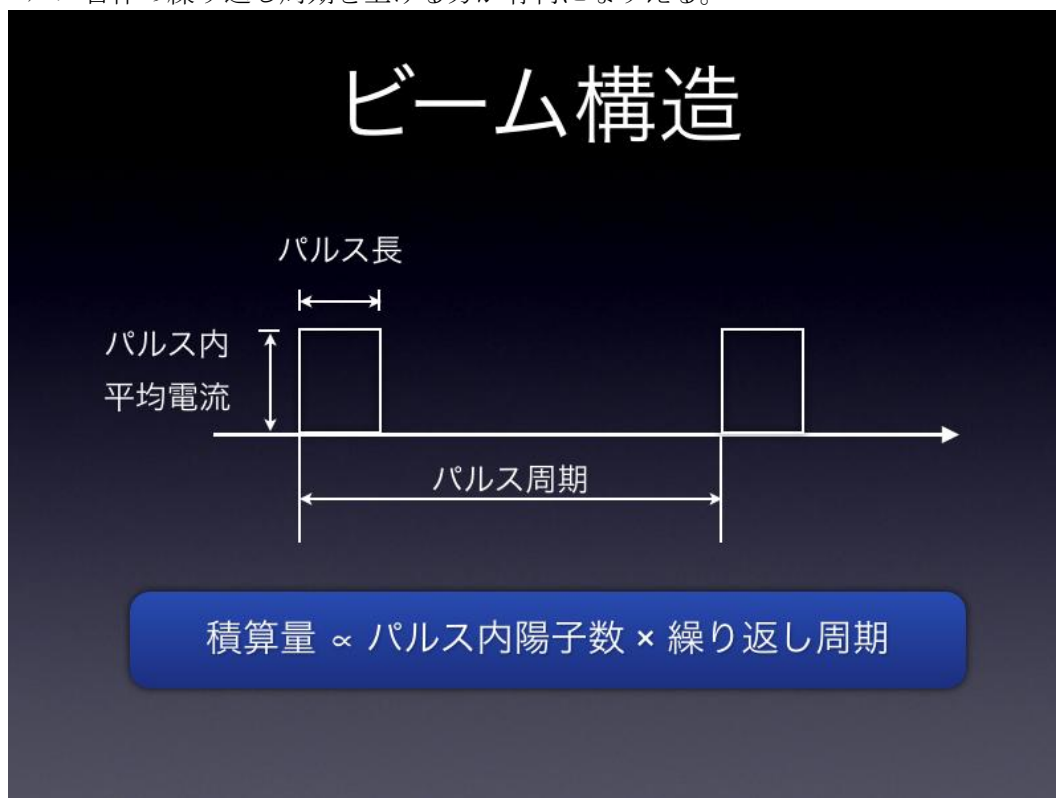
まず、エネルギー可変について検討する。加速器中性子源の場合ターゲットに最適化された条件で固定する事が可能である。一方陽子や重イオンをRI製造に用いる際には、生成核や核反応の条件の最適化にするため連続にエネルギー可変出来る方が望ましい。Linacは加速に使用する加速タンク(一段あたり4 MV)をon/offすることで、4 MeVステップでエネルギーを変える事が可能である。HM-30は固定エネルギーで設計されており、30 MeVにほぼ固定されるが、取り出し用の荷電変換フォイルの場所を調整する事で数%の調整が可能である。930は当初からエネルギー可変を想定して設計されており、7 MeV~90 MeV(陽子の場合)の範囲で連続にエネルギー可変が可能である。なお、930は重イオン加速も可能であるが、得られる加速エネルギーはイオン源の多価イオン生成能力に左右される。ビームエネルギーの精度・分散は直線加速器のLinacに比べ、円形加速器のサイクロトロンの方が良い。

6. 2. 3. 2 ビームの時間構造について

次に取り出されるビームの時間構造について検討する。原子炉に対する加速器中性子源の利点として、加速器からのビームの時間構造に応じた中性子のパルス化が容易に実現出来

る点がある。パルス中性子は中性子分光などで必須のものであり、今回の計画においてビームのパルス化の検討を進める必要がある。

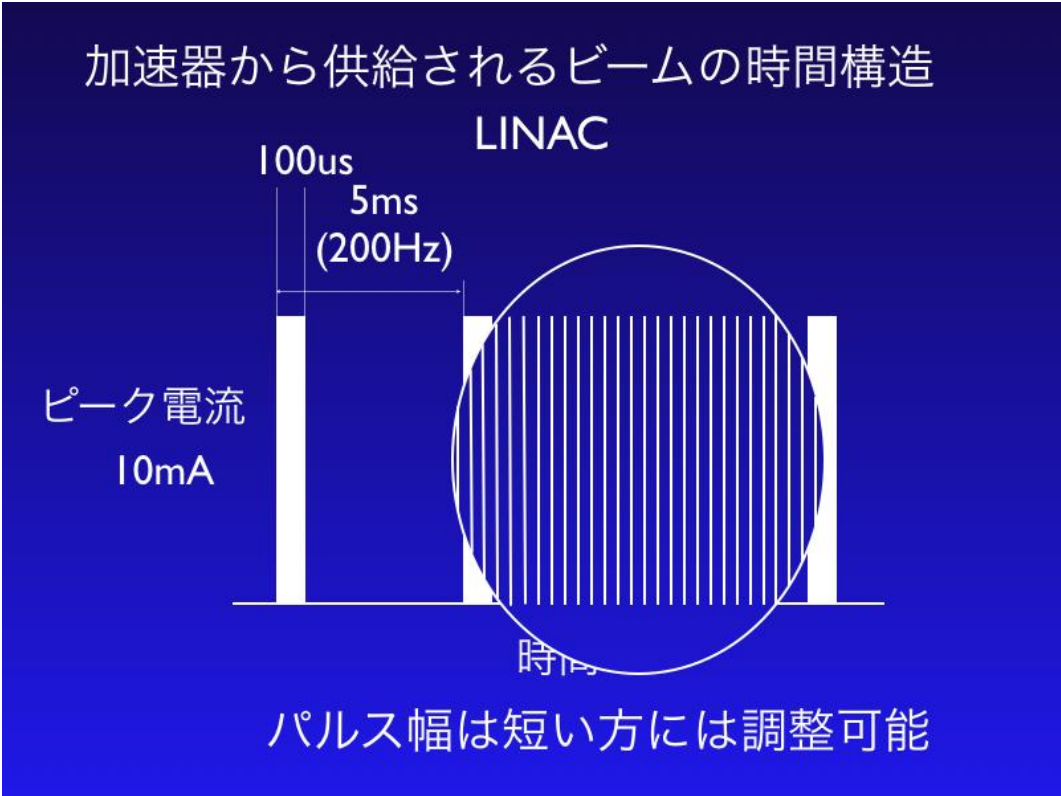
ビームの時間構造を特徴づけるものとして、ビームのパルス長、パルス内での平均電流、そしてそのパルスの繰り返し（周期）がある。パルス中性子源のためのドライバとして考えた場合、高いパルス内平均電流と短いパルス幅を実現し、その繰り返し周期が任意に設定出来ることが望ましい。一方単純な中性子源としては、パルス内平均電流を上げるよりもパルス自体の繰り返し周期を上げる方が有利になりえる。



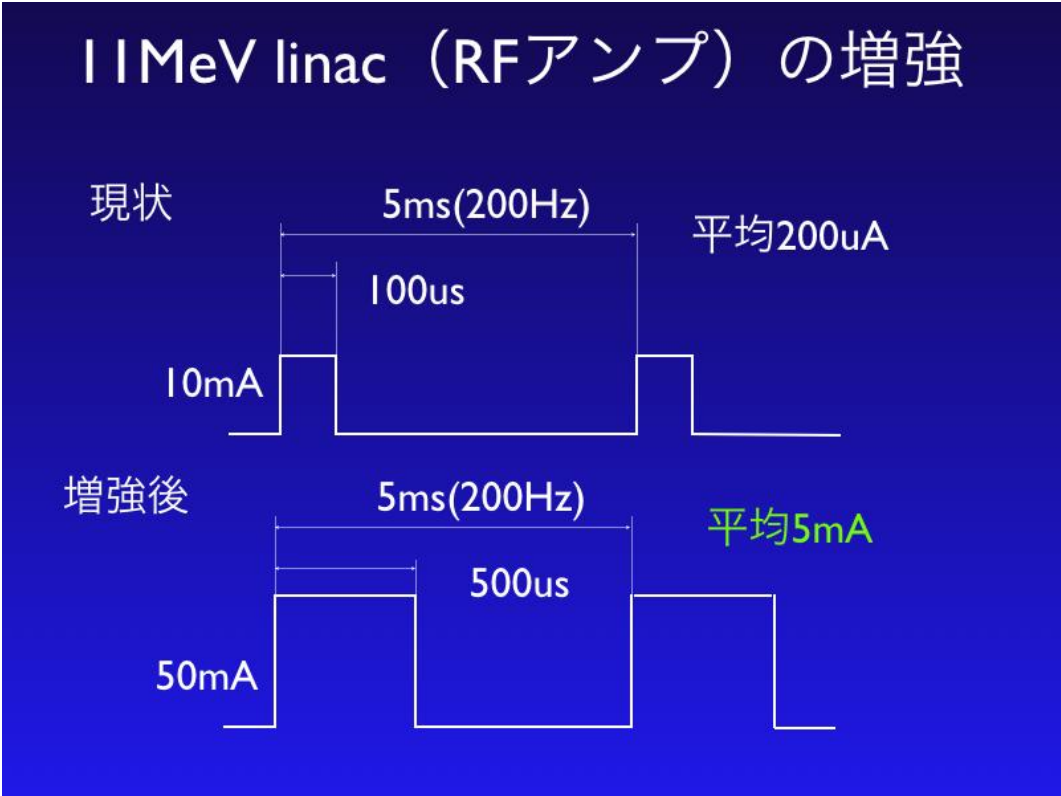
第39図 ビームの時間構造

この観点から 6.2.2 で想定されている各加速器からのビームの時間構造について順次検討をしていく。

まず Linac で想定される時間構造をしめす。Linac の場合、イオン源の on/off によりパルス化を実現しており、そのパルス内には ns 程度の幅の非常に短い周期のビームバーストが並んだ構造になっている。案 1、2 の Linac では 10 mA、100 μ s のパルスを 5 ms 周期で繰り返すことにより、平均電流 200 μ A が達成出来ると考えられている。100 μ s 幅で 5 ms 周期というビーム幅は加速用高周波電源の能力の制限によるもので、加速用高周波電源の増強により 500 μ s 幅、5 ms 周期が実現できるとされている。

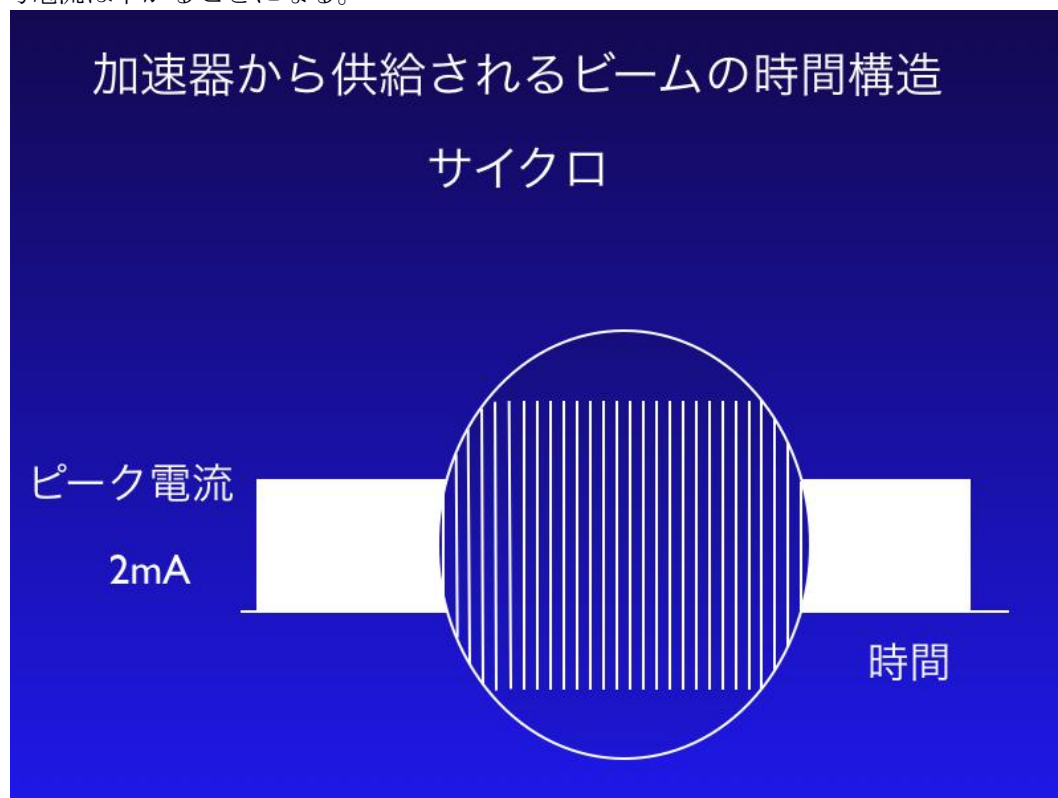


第40図 Linac ビームの時間構造



第41図 RFアンプ増強によるパルス幅の増大

次にサイクロトロンの場合のビーム構造であるが、イオン源から連続入射を行ってそのまま加速して取り出す、いわゆる DC 加速が可能である。サイクロトロンも高周波電場による加速を行っているので、連続ビームとはいえ、ns 程度の幅のビームバーストが数十 MHz 程度の高周波電場の周期で並んだ構造になっている。サイクロトロンでパルス化を実現する場合、イオン源側でビームを on/off することになるため、時間構造としては Linac とあまり変わらない形になる。ピーク電流はそのままにビームを on/off するため、on/off することで平均電流は下がることになる。



第42図 サイクロのビームの時間構造

パルス化の方法(3)

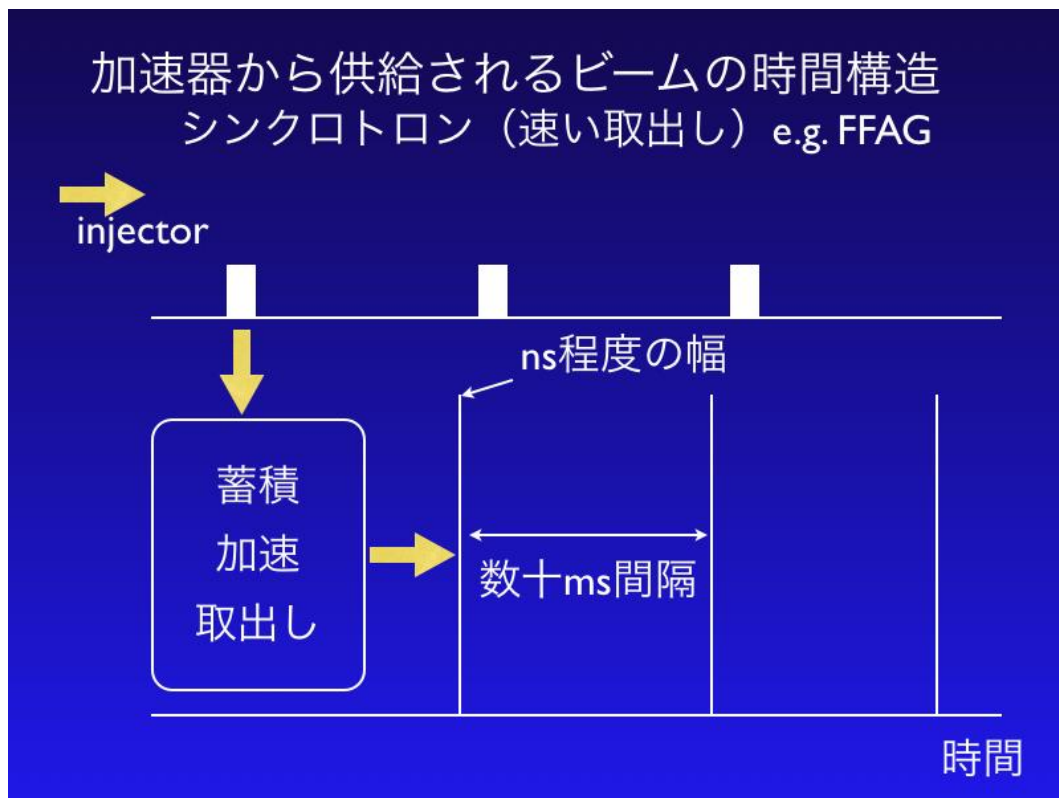
入射ビームをパルス化



JAERIの例：200 nsの立ち上がり、 $\mu\text{s}\sim\text{ms}$ 幅

第43図 サイクロでのビームパルス化の方法

FFAGの場合のパルスはLinacやサイクロトロン¹⁾のビームバースト相当のns程度のものであり、これが数十msの加速周期ごとに出てくることになる。そのためFFAGではパルス内平均電流が詰め込められる粒子の量への要求がサイクロやLinacにくらべて厳しくなる。例えば平均電流1 μA 程度のビームを得るためには、数十msの加速周期ではパルス内平均電流が1Aまで到達する必要がある。このような高いパルス電流を実現するため、数百ターンに渡ってパルス内に繰り返しビームを入射し、パルス内に保持出来る限界まで電流を高めた後加速する方法が検討されている。



第44図 FFAGのビームの時間構造

6. 2. 3. 3 ビーム強度について

加速器中性子源の中性子発生量は、加速エネルギーが同じ場合は得られるビーム電流で決まる。加速器中性子源を原子炉のように利用するときは、単位時間あたりに何個の粒子をターゲットに送り込めるかが重要となる。またパルス利用の場合はパルス内平均電流がどれだけ高いかが重要になる。

これらをふまえた場合、単純な中性子源として利用する場合は平均電流が最大である Linac が優れており、サイクロトロンもそれに近い性能を発揮すると考えられるが、FFAG は平均電流では Linac やサイクロトロンの二桁あるいはそれ以上悪くなる。一方パルス利用を考えた場合、FFAG はそのパルス内平均電流の高さが圧倒的に高いため有利である。

6. 2. 3. 3 加速粒子の種類について

今回のプロジェクトでは中性子源利用だけではなく、RI 製造を目的とする研究も含まれている。RI 製造のためには中性子源で発生させる中性子だけではなく、加速器からのビーム自体の利用も想定されている。

一般に RI 製造には陽子だけが利用されるわけではなく、目的とする核に応じて重陽子やヘリウム、さらに重い重イオンなどが選択され使用されている。可能であれば様々な粒子が加速出来る方が有利である。

現在候補として上がっている案 1~6 のうち、Linac、HM-30、Linac+FFAG では陽子

加速のみが可能であり、様々な粒子を加速出来るのは 930 型サイクロのみである。実際の加速の可否は整備されるイオン源の能力に依存する部分もあるため、参考として実際に 930 を設置している JAEA 高崎、東北大サイクロで加速可能となっている加速粒子の一覧を示す。

表5 JAEA 高崎での加速粒子の例 (抜粋)

イオン	エネルギー	ビーム
H ⁺	10~90 MeV	1~8 μA
d ⁺	10~50 MeV	3~9 μA
A	20~107 MeV	0.5~4 μA
¹² C	75~320 MeV	0.33~660 粒子 nA
¹⁶ O	100~335 MeV	4.3~750 粒子 nA
⁴⁰ Ar	195~530 MeV	5~250 粒子 nA
⁵⁶ Fe	400 MeV	35 粒子 nA
¹²⁹ Xe	450~560 MeV	0.2~4.5 粒子 nA

表6 東北大サイクロの加速粒子の例

イ)、陽イオン

加速粒子	加速エネルギー (メガ電子ボルトMeV)	ビーム強度 (マイクロアンペアμA)
陽子	10-90	50
重陽子	10-65	50
ヘリウム-3	20-170	50
アルファ粒子	20-130	50
炭素- 12	20-397	5 粒子
窒素- 14	20-463	5 粒子
酸素- 16	20-530	5 粒子
ネオン- 20	20-662	5 粒子
硫黄- 32	20-698	3 粒子
アルゴン- 40	20-744	3 粒子
クリプトン- 86	20-695	3 粒子
ゼノン- 129	20-748	1 粒子

ロ)、負イオン

加速粒子	加速エネルギー (メガ電子ボルトMeV)	ビーム強度 (マイクロアンペアμA)
陽子	10-50	300
重陽子	10-25	300

表7 各方式の比較

各方式の比較

	Linac	HM30	930サイクロ
エネルギー可変	ステップ式(注1)	数%、複数固定(注2)	連続 (7-90MeV)
エネルギー精度(注3)	△	○	○
時間構造	パルス	D.C. (RF周期のパルス)	D.C.
平均電流 (目標値)	5 mA	2 mA	500uA(50MeV) 50uA(90MeV)
取り出し後のイオン (注4)	正 (負)	正	正
運転経費(注5)	△	○	○
電力効率 (ビーム電力/消費電力)	~30%	~30%	~30%

(注1) 加速タンクごとにon/offで可変。4 MeVステップ

(注2) 取り出し位置の微調と、全く別の取り出し場所を製作

(注3) 取り出したビームのエネルギーの精度・分散

(注4) FFAG入射器としては負イオンが必須

(注5) 電気代など。

各方式の比較

案	方式	エネルギー (MeV)	平均電流 (mA)	ピーク電流 (mA)	時間構造	ビーム パワー (kW)	熱中性子数※ (n/cm ² /s)
1	LINAC	11	5	50	パルス (10%)	55	1.0E+11
2	LINAC	30	5	50	パルス (10%)	150	7.5E+11
3	Cyclotron	30	2	-	DC (パルス化も検討中)	60	3.0E+11
4	Cyclotron	50	0.5	-	DC (パルス化も検討中)	25	2.1E+11
5	FFAG	150	0.005	5000	パルス (数100ns, 10 - 100Hz)	0.75	2.5E+10
6	FFAG	700	0.005	5000	パルス (数100ns, 10 - 100Hz)	3.5	4.8E+11

※ 各案で想定されるターゲットでの大まかな目安
正確な評価はターゲットグループを参照の事

6. 2. 4 2つの案の詳細

6. 2. 4. 1 LINAC案

Linac案では「Linacモード」と「FFAGモード」の両方のビーム利用が可能である。「Linacモード」とは30MeV LinacからのH⁺ビームを直接ターゲットに入射して大強度中性子源として用いるモードで、この場合は中性子強度は稼げるが、パルス幅は5msと長いのでパルス中性子源としては使えない。チョッパーを用いた短パルス化は可能であるが、パルスを短くした分だけビーム強度が減ってしまう。一方「FFAGモード」はLinacからのH-ビームをFFAGに入射し150MeVまで加速し40ns幅のパルスビームとして重金属に照射して核破碎中性子を発生させる。時間構造は問わないが大強度が欲しいユーザとパルス構造が必須であるユーザの両方の要求を満たすビームをタイムシェアリングで供給できるのがこの案の特徴である。イオン源、RFQ、DTLを含むLINACシステム全体の長さは約14mになる。現在検討中の30 MeV Linacの基本仕様は以下の通りである。

加速器構造

構成（機能分離方式）：

（加速）425MHz アルバレ空洞（5タンク）

（集束）3連四極永久磁石（空洞間に設置）

加速エネルギー：

11 - 14 MeV（第1タンク）

14 - 18 MeV（第2タンク）

18 - 22 MeV（第3タンク）

22 - 26 MeV（第4タンク）

26 - 30 MeV（第5タンク）

高周波電力

実効シャントインピーダンス $R_s = 44 \text{ M}\Omega / \text{m}$

実効加速電場勾配 $V = 2.4 \text{ MV} / \text{m}$

必要電力（ピーク） $P = 1520 \text{ kW}$

現在イノベーションリサーチラボでは「実験装置室」に150 MeV FFAGリングが設置され、ビーム輸送用の貫通穴を通し「照射ホール」に設置された11MeV Linacからのビームを入射・加速している。将来Linacを30MeVにアップグレードする際、既存の11 MeV Linacは「照射ホール」から「実験装置室」へ移設することを想定している。

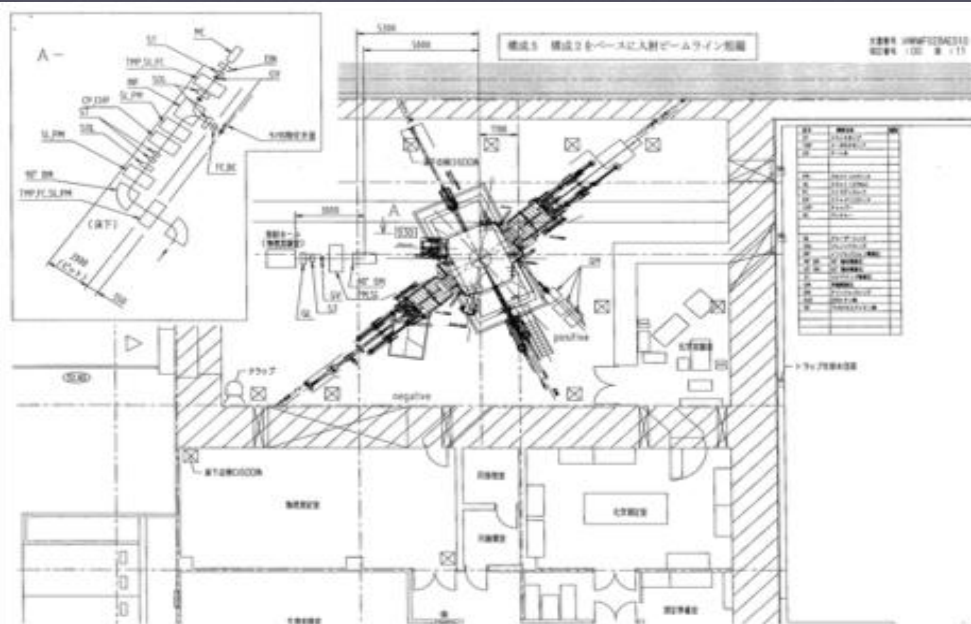
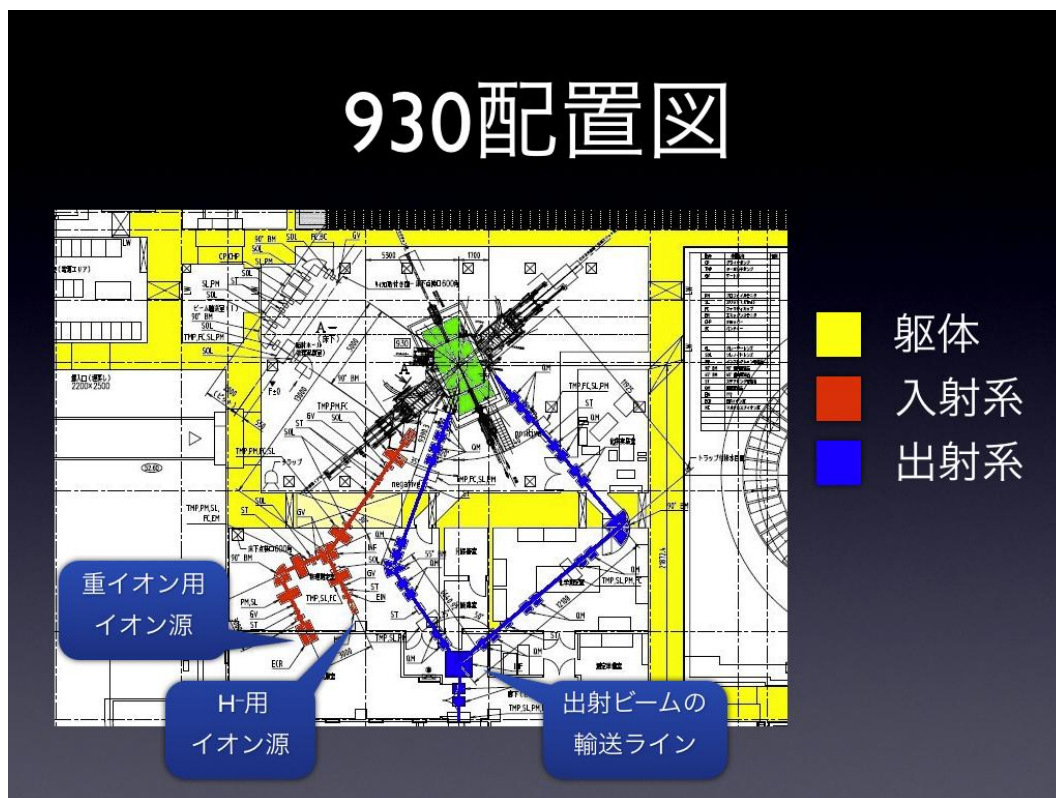
6. 2. 4. 2 サイクロトロン案

もう一つの案であるサイクロトロンは以下の通りである。設置の様子と関連する入出射ビームラインを第45図に示す。

930サイクロトロンはイノベーションラボ照射ホールに設置する。イオン源は隣接する物理実験室に、H用イオン源と重イオン用イオン源を設置する。930サイクロトロンは本体中央下部から入射となるため、イオン源からのビームは既存建屋の開口部を利用して照射ホール内へ持ち込んだ後、照射ホール内で地下ピットへ一旦下ろし、サイクロトロン下部より入射する形を取る。照射ホール地下ピット内へ設置しない理由は、地下水等の影響で地下ピット内の湿度が高く高圧ステージの設置のための空調その他の対策が必要となる事、さらにピット階の天井高が2mと低く、機器設置の自由度やメンテナンスの面で制約が大きいことが挙げられる。

930本体は、JAEA高崎および東北大CYRICに設置されている930サイクロトロンと同一設計であるが、中性子源向けの大電流陽子ビームを供給するため、東北大で成功している

H⁺加速スキームを採用する。H⁺加速時は、陽子ビームは6時半方向のポートから負イオン用出射ビームラインへ取り出される。H⁺加速時および重イオン加速時は930標準のデフレクタによる取り出しが行われ、3時方向にある出射ポートから取り出される。負イオンビームラインと正イオンビームラインはイノベーションラボ出口付近で合流し、隣接して建設されるコラボレーションラボへ輸送される。また、将来FFAGからのビームを利用するときは、化学実験室付近で正イオンビームラインと合流させる予定である。



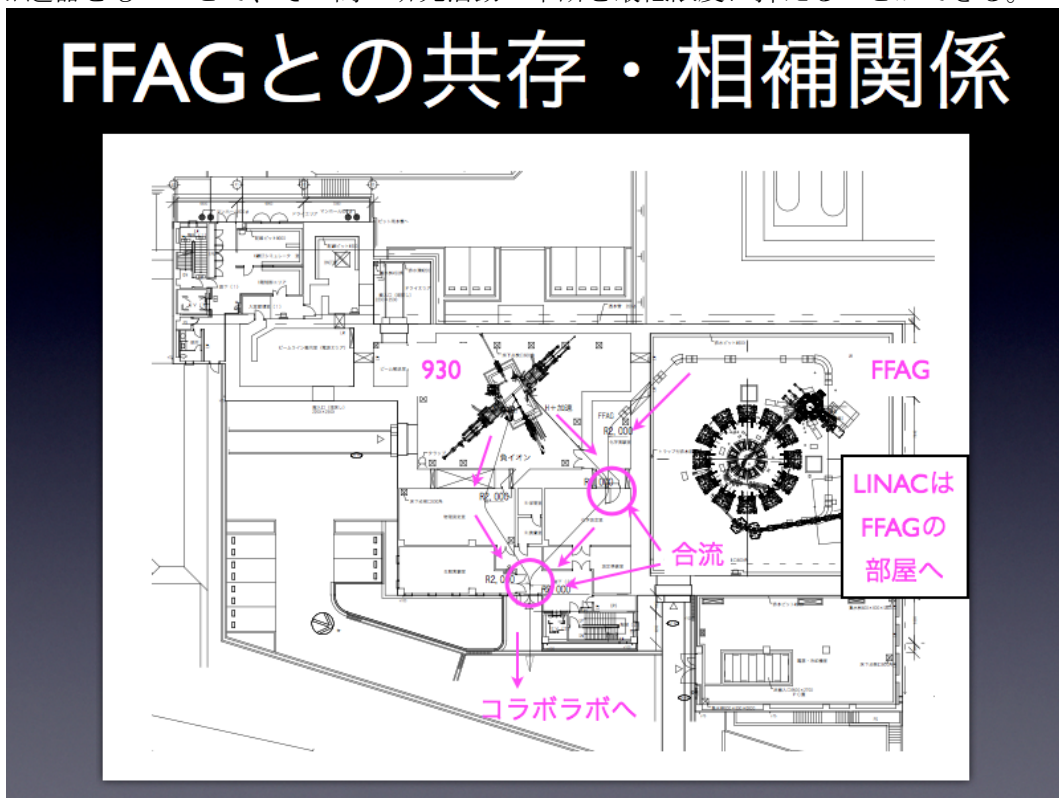
第45図 930サイクロトロン配置図

6. 2. 4. 3 Linac+FFAG 案とサイクロトロン案 の両立性の検討

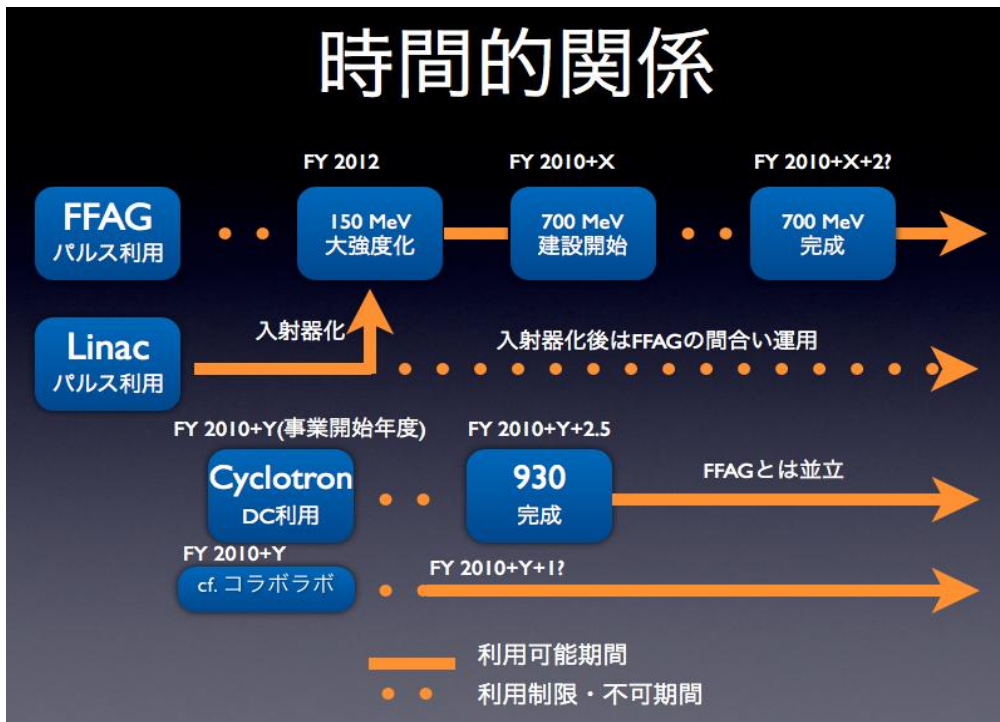
Linac+FFAG は、パルス中性子利用に最適のエネルギー可変のピークの高い短パルスビームを実現し、Linac 単体で中性子の単純照射向けのエネルギー固定の大強度陽子ビームを実現するが、大強度ビームでのエネルギー可変や RI 製造、ビーム自体の多目的利用では不利である。一方 930 はエネルギー可変の大強度陽子ビームと重イオン加速が可能であり、中性子源のエネルギースペクトルの多様性の実現や RI 製造、ビーム自体の多目的利用が可能である。その一方、パルス運転ではパルス幅、パルスピークともに Linac 単体未満の性能となるのであまり向かない。このように相補的な関係になると考えられる。

さらに、第 4 6 図に示すように Linac+FFAG と 930 はお互いが干渉しない形で建設可能であり、一方の運転中断が他方のシステムへ影響を及ぼす可能性が低い。そのため、運用上でも相補的な関係となり得る。

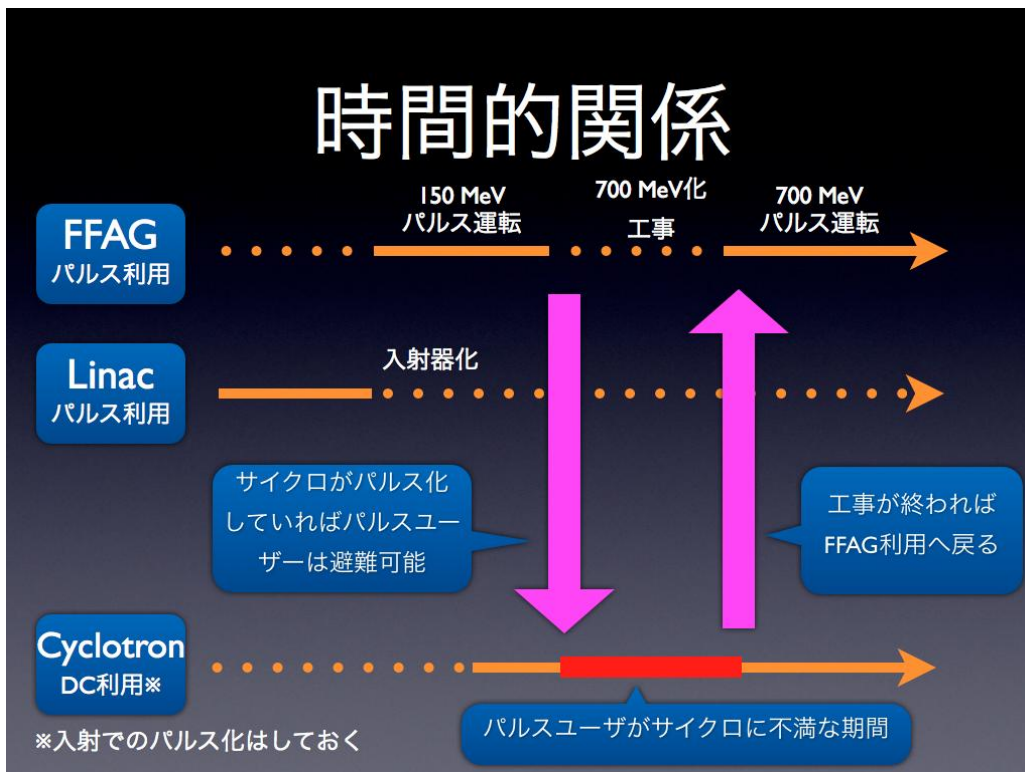
そのため、Linac+FFAG と 930 の両方が建設出来れば、単に利用分野が広がるだけでなく将来想定される加速器のアップグレードに伴う研究の中断を最小限に防ぐ事も期待出来る。今後想定される加速器のアップグレードをまとめたものを第 4 7 図に示す。Linac+FFAG の大電流化、あるいは案 6 の 700 MeV へのアップグレードを想定した場合、改造や試験調整のため 1〜数年間 Linac や FFAG の利用を中断する必要がある。しかし全く独立に運用できる加速器をもつことで、その間の研究活動の中断を最低限度に抑えることができる。



第 4 6 図 Linac+FFAG および 930 の設置例



第47図 現在検討されているFFAG関係のアップグレードパスと、現計画における各加速器の想定される稼働状況をまとめたもの。FFAGの700 MeV化は開始後2年、930の場合発注後30ヶ月でビーム供用開始可能とされている。



第48図 中性子利用に注目した場合の利用状況。700 MeV化中の試験調整期間も930をバックアップとして利用し得る。

6. 2. 5 まとめ

これまで見てきた様に、**Linac+FFAG** 案は高フルエンスユーザーとパルスユーザーの両方に対応可能で、さらに 700MeV リングへの拡張性を備えている。この案のパルスモードの成否は本報告書 4.3 節のビーム増強計画の進捗に依存することになるが、2011 年 2 月 現在、H 入射による電流増強計画に根本的な問題は見られない。一方、サイクロトロン(SHI 930)は加速陽子の連続的なエネルギー可変性や重イオン加速の可能性等、**Linac+FFAG** には無い特徴を持つ。

6. 3 パルス中性子ターゲット (日野)

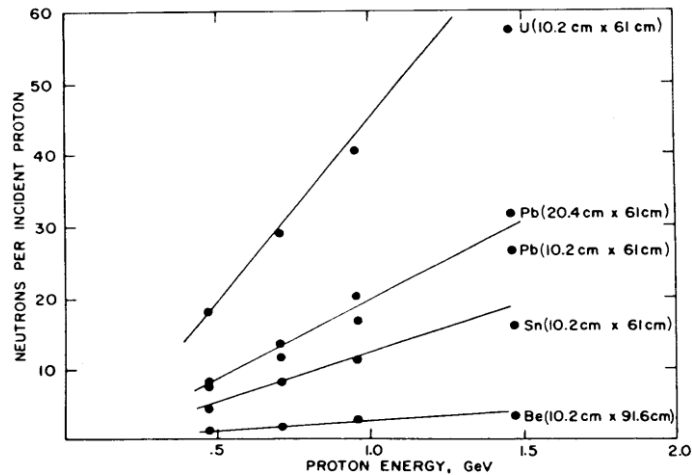
中性子を発生させるためには核反応を起こす必要がある。ここでは陽子加速器を用いて中性子発生の場合、その発生中性子数 I は陽子の運動エネルギーが大きければ大きいほど、また陽子の数が多ければ多いほど、発生中性子数が多い。

陽子ビームの強さはアンペアで表されることが多い。陽子ビーム C (Ampere)、陽子の運動エネルギー(E_p)依存の発生率 $Y(E,A)$ とすると、発生する中性子数 I は $I=Y(E,A)C$ で記述される。1 アンペアは導体の断面を1秒間に1クーロンの電荷が流れる場合の電流と定義できる。1クーロンは約 6.24×10^{18} 個の荷電粒子と等しいので、陽子ビームが $1 \mu A$ という、一秒間に陽子が 6.24×10^{12} 個あるビームことになる。中性子発生率は、高エネルギーの陽子ビームの場合、経験的に下記の式で求められる (第49図)。

$$Y(E,A) = 0.1(E_p - 0.12)(A + 20) \quad \text{核分裂物質以外}$$

$$= 5.0(E_p - 0.12) \quad \text{{}^{238}\text{U} の場合}$$

ここで A は原子量、 E_p の単位は GeV である。入射エネルギーだけでなく、ターゲットは重い元素であればあるほど中性子の発生効率は大きい。そのため、例えば J-PARC/JSNS のような大強度加速器中性子源では陽子を 3GeV まで加速させ、重い元素である水銀をターゲットとした体系をとっている (ターゲット除熱のために液体である水銀を採用している)。しかし、発生した中性子の運動エネルギーは陽子のエネルギー(E_p)に依存する。そのため放射線遮蔽の観点からは、入射中性子エネルギーは低い方が望ましい。入射陽子ビームの運動エネルギー(E_p)が低くても、陽子ビーム強度(電流)が大きければ中性子強度を得られるが、陽子の入射エネルギーが低くなると中性子発生率が劇的に減少し、かつ先に示した重い元素ほど中性子発生率が高いという訳ではなくなる。例えば 30MeV の陽子ビームの場合、ターゲットがベリリウム(Be)の中性子発生率は、 $0.0304n/p$ 、ずっと重いタングステン(W)



第49図 中性子発生率の入射陽子ビームエネルギー依存

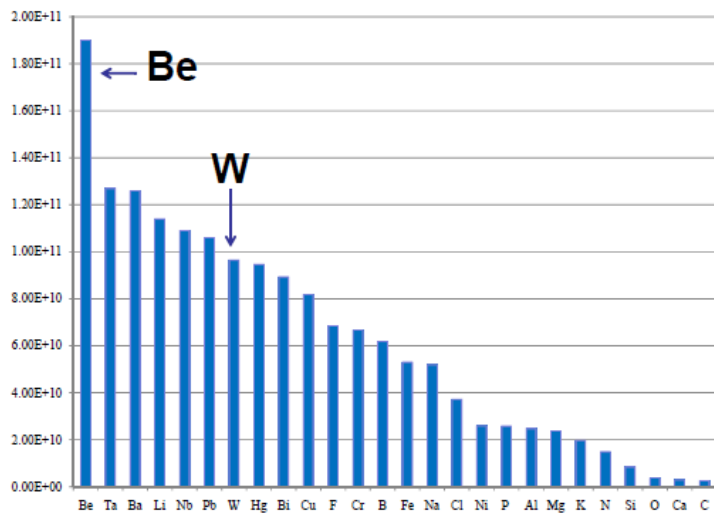


表8 30MeV 陽子ビーム(1mA)に対する各元素ターゲットの中性子発生量

は 0.0155n/p とその半分である。Be の融点は 1278°C と比較的高く熱伝導率も良い。また、Be は W に対して、4 桁以上周辺線量当量が小さく減衰も早い。そのため、ターゲット周辺の残留周辺線量当量なども考慮しても、Be が使われている。

表 8 に入射陽子ビームのエネルギーが 30MeV で強度が 1mA の場合の、各元素ターゲットの中性子発生量(n/s)を示す。なお 100MeV 陽子ビームでは W で 0.304n/p となり、熱的にも W がターゲットとして優位となってくる。

さらに照射同様、ビーム利用でも最もユーザーの多い利用は、熱中性子以下の運動エネルギーの中性子である。熱中性子は速中性子を弾性散乱、非弾性散乱を用いて水等で減速する（熱平衡にする）。この仕組みは原子炉と同じで、ビリヤード散乱で減速するものと同様であり、パルス中性子源とした場合、その時間構造は体系からの脱出時間の寄与が大きい。そのためパルス特性とその中性子源の幾何学的構造とは密接な関係がある。特にシンクロトロンや FFAG 等の μs 以下の時間幅の短いパルス(陽子)ビームが得られる場合は、パルス幅は減速体系の幾何学的構造(大きさ)で決まり、波長が長いものほどパルス幅も長くなる。冷中性子源を含んだ体系の典型的なモデル計算については、次章の記述（安部氏）で記述する。

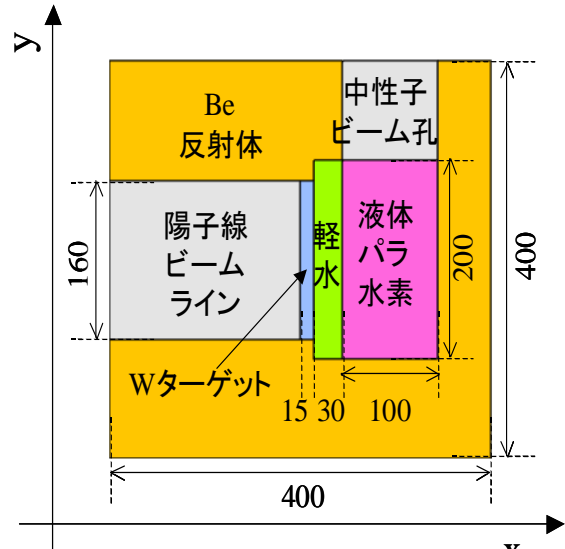
6. 4 パルス中性子用 CNS (安部・田崎)

6. 4. 1 KURRI パルス中性子源の核特性評価方法

パルス中性子源の核特性評価のために、ターゲット・減速材・反射体 (TMD) システムの基準となるモデルを作成した (第 50 図). 陽子加速器は FFAG 加速器を想定し, 表 9 に示す諸元を仮定した. 第 50 図の陽子ビームラインから 150MeV 陽子を W ターゲットに入射し, 高速中性子を発生させる. 円柱形状の W ターゲット厚さは 15mm で, 150MeV 陽子のタングステン中の飛程より若干小さい値としている (ターゲット厚さをこれ以上大きくしても, 熱付与が増えるだけで, 中性子 yield は増加しないため). また, ターゲット直径は, 初期値として BNCT 用加速器での Be ターゲット直径 16cm を採用している. ただし, FFAG 加速器の出力は BNCT 用加速器 (出力: 30 kW) の 1/40 であるため, ターゲット直径をより小さくすることは可能であろうと考える. ターゲット直径を変えた解析は後に述べる. W ターゲットの背面には軽水前置減速材を設置し, その後段に液体パラ水素冷減速材を配置する. 両減速材の形状は直方体で, 初期寸法は, それぞれ, 3cm (x 方向) × 20cm (y 方向) × 20cm (z 方向), 10cm × 20cm × 20cm である. ターゲットと減速材の周りは立方体形状 (40cm × 40cm × 40cm) の反射体で囲み, 中性子ビームは図のように入射陽子ビームに対し 90 度方向に取り出す. 中性子束の評価はこのビーム孔の冷減速材表面中央で行い, 評価する中性子エネルギーの範囲は 0.1~100meV とする. 評価項目は (1) 時間平均中性子束, (2) 中性子ピーク強度, (3) パルス半値全幅, (4) 時間平均スペクトルである. 反射体の厚さ, ターゲット直径, 減速材寸法を基準モデルから変化させてこれらの値を評価し, より高い中性子強度が得られる設定を探索する. なお, 中性子輸送解析には Phits を利用し, 核データには MCNPX 用データを用いた.

表 9 FFAG 加速器の諸元

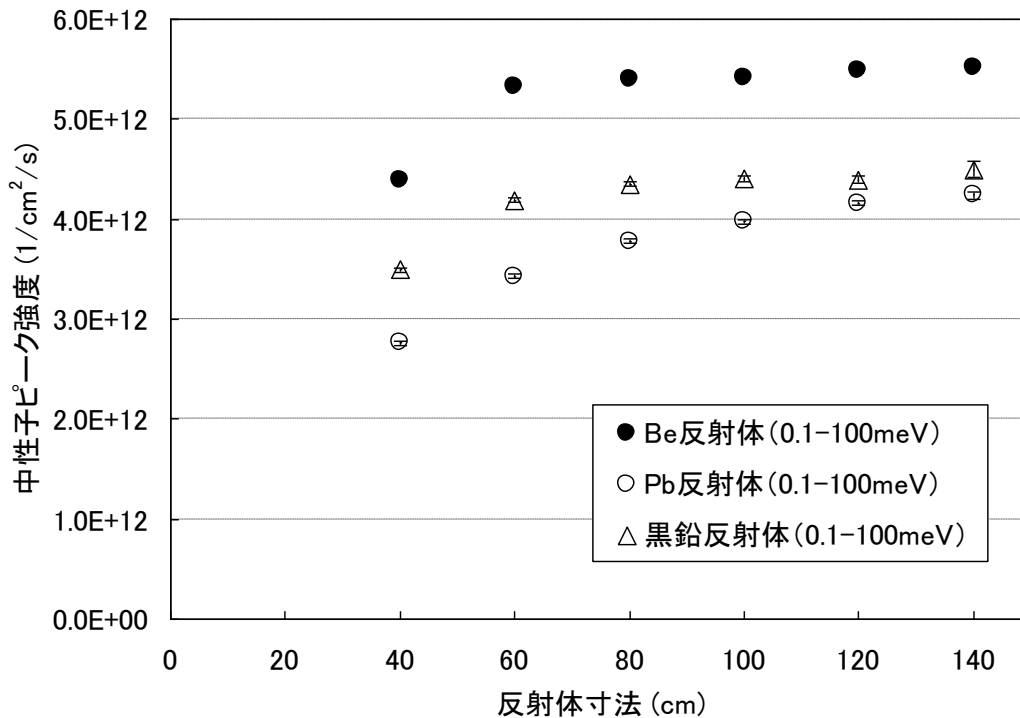
陽子エネルギー (MeV)	150
パルス幅 (ns)	40
パルス内平均電流 (μ A)	12.5
周波数 (Hz)	10
出力 (kW)	0.75



第 50 図 TMR システムの水平断面図

6. 4. 2 反射体の検討

まず反射体の材質と必要な厚さを検討するために, Be, Pb, 黒鉛反射体に対して, 立方体の辺の寸法を 40cm から 140cm の範囲で変化させ, 冷減速材表面で得られる中性子束を評価した. 図 2 に反射体寸法の関数として中性子ピーク強度を解析した結果を示す. 第 51 図から反射体の効率は Be, 黒鉛, Pb の順に良く, Be 反射体の場合, 立方体寸法が 80cm 程度で中性子束強度が飽和することがわかる. よって, 以下の評価では, 一辺の長さが 80cm の Be 反射体を用いることとする.



第51図 反射体材料と寸法による中性子ピーク強度の変化

6. 4. 3 ターゲット直径と減速材寸法の検討

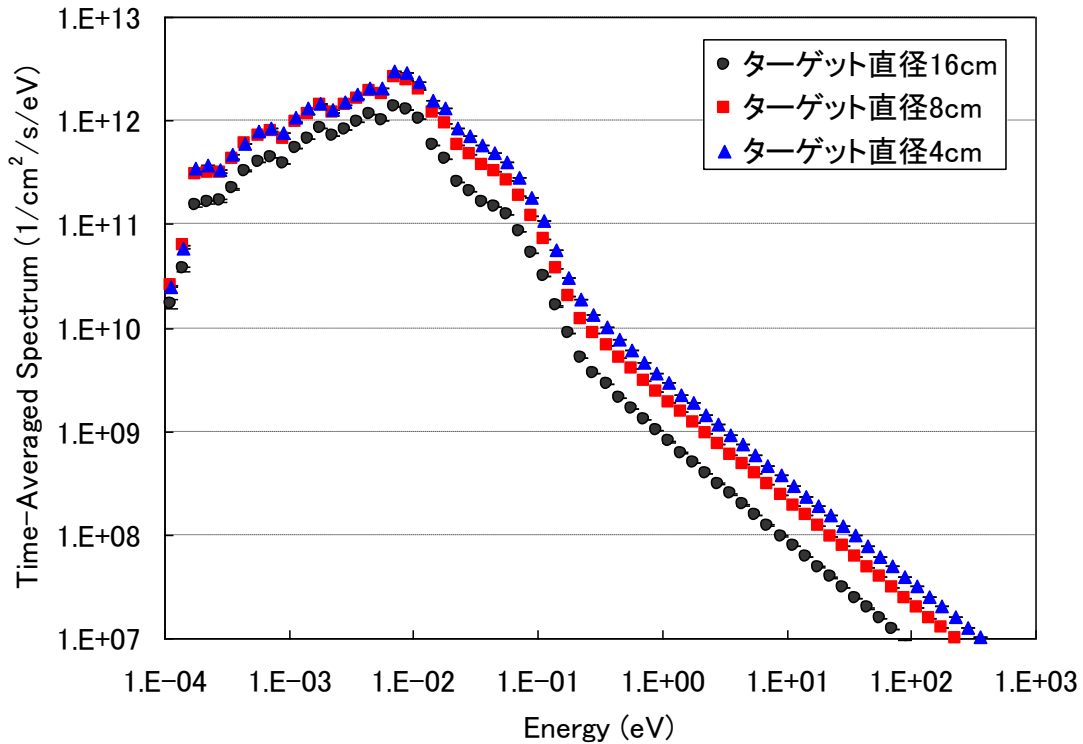
一般により高い中性子束を得るためには、高速中性子をより小さな領域で発生させる方が有利である。このため、ターゲット直径を基準モデルの 1/2, 1/4 とした場合の中性子束強度を解析した。ターゲットの大きさに合わせて、軽水、液体パラ水素減速材の寸法も変化させ、直径 8cm のターゲットに対しては、軽水と液体水素減速材の寸法を、それぞれ、3cm×10cm×10cm, 10cm×10cm×10cm とし、直径 4cm のターゲットに対しては、それぞれ、3cm×6cm×6cm, 10cm×6cm×6cm とした。

表 10 に得られた中性子束強度とパルス FWHM を示す。ターゲット直径を小さくするほど、時間平均中性子束、中性子束ピーク強度ともに増加する一方、パルス幅は若干減少している。この理由として、先に述べたように、小さな直径のターゲットほど高速中性子の発生密度が高いことがある。

表 10 ターゲット直径による中性子束強度の変化

また、液体パラ水素中の熱・冷中性子の拡散距離は 5~8cm 程度であるため、小さな寸法の冷減速材ほど熱・冷中性子が冷減速材に吸収されることなく表面から漏れ出すことができるようになり、解析した中では直径 4cm のターゲットの場合で中性子束が最大になったものとする。より小さな直径のターゲットほど中性子束強度が増加する可能性はあるが、ターゲットの除熱のための熱的な評価が必要になる。一方、減速材の大きさをさらに小さくすると高速中性子の減速効率が悪化するため、冷中性子束強度は低下すると予測される。第 5 2 図に示す時間平均スペクトルでは、ターゲット直径および減速材の寸法が小さいほどスペクトル強度は増加しているが、スペクトルは硬くなっており、こうした傾向が現れ始めているものとする。

反射体	Be		
	16	8	4
ターゲット直径 (cm)			
時間平均中性子束 (1/cm ² /sec)	2.6E+10	5.2E+10	7.0E+10
中性子ピーク強度 (1/cm ² /sec)	5.4E+12	1.1E+13	1.4E+13
中性子パルス FWHM (μ s)	2.6E+02	2.2E+02	2.2E+02

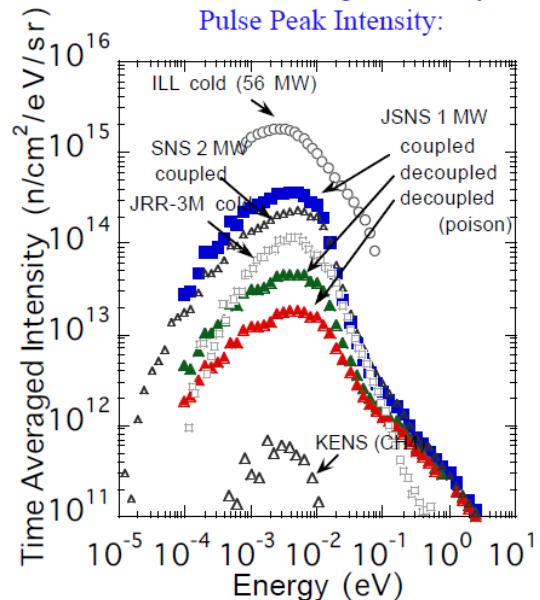


第5 2 図 時間平均中性子スペクトル

6. 4. 4 KURRI パルス中性子源モデルと KENS との比較

比較のための KENS の中性子束データは、第 5 3 図に示す時間平均スペクトル[1]から得た。第 5 3 図から KENS の時間平均スペクトル $\phi_{av}(E)$ の最大値を読み取ると、3meV で最大値 6×10^{11} (1/cm²/s/eV/str) をとることがわかる。ここで、 $\phi_{av}(E)$ がマクスウェル分布に従うとすると、 $\phi_{av}(E)$ は時間平均中性子束 ϕ_t と中性子温度 E_n を用いて、 $\phi_{av}(E) = \phi_t E / (E_n)^2 \exp(-E / E_n) / 4\pi$ と表せる。 $\phi_{av}(E)$ が $E = E_n$ で最大値 $\phi_t / (4\pi E_n e)$ をとることから、時間平均中性子束 ϕ_t を評価すると、 $\phi_t = 6.1 \times 10^{10}$ (1/cm²/s) である。パルスを三角波と見なし、パルス周波数 f 、パルス半値全幅 FWHM を t_w とすると、パルスのピーク強度 ϕ_p は $\phi_p = \phi_t / (f t_w)$ と表せる。KENS の値 $f=20$ Hz、 $t_w=100 \mu s$ を与えると、KENS の瞬間的なピーク強度は $\phi_p = 3.1 \times 10^{13}$ (1/cm²/s) と評価できる。ただし、 $t_w=100 \mu s$ は固体メタン減速材の減速特性[2]から推定した値である。

KENS は 500MeV の陽子ビーム (時間平均電流 $6 \mu A$, 20Hz, 3kW) を劣化ウランターゲットに照射して高速中性子を発生させている。このときの中性子 yield は約 19 (neutrons



第5 3 図 時間平均中性子束の比較[1]

/proton) である。KENS 陽子加速器の 1 パルスあたりの陽子数は $6 \times 10^{-6} / (1.6 \times 10^{-19} \times 20)$ であるから、1 パルスあたりの高速中性子発生数 n_{fp} は $n_{fp} = 3.6 \times 10^{13}$ (neutrons/pulse) である。冷減速材と反射体による高速中性子から冷・熱中性子への変換効率の指標 η を $\eta = \phi_p / n_{fp}$ として定義すると、KENS では $\eta = 0.86$ である。

解析した KURRI 中性子源モデルの中で最高のピーク強度を得たケースでは、瞬間的な中性子ピーク強度は 1.4×10^{13} (1/cm²/s) である。150MeV 陽子が W ターゲットに入射したときの中性子 yield は約 0.66 であり、想定する FFAG 加速器陽子ビームの時間平均電流は $5 \mu\text{A}$ 、周波数は 10Hz であるので、1 パルスあたりの高速中性子発生数は 2.1×10^{12} となる。これらの値から KURRI 中性子源モデルでは $\eta = 6.7$ である。KENS の値と比較すると、KURRI 中性子源モデルでは冷減速材・反射体による高速中性子の変換効率は 7.8 倍となる。この理由として、(1) ターゲットと減速材とのカップリング、(2) 反射体と冷減速材の間のデカップラの有無、(3) 中性子ビーム孔の大きさ、(4) 冷減速材の違いが考えられ、定性的には、(1)、(2)、(3) の要因は KURRI 中性子源モデルに有利に、(4) は KENS に有利 (KENS は固体 CH₄ 冷減速材) に働くと考えられる。

以上の KURRI 中性子源モデルと KENS の中性子源特性の比較結果を表 1 1 にまとめる。KURRI 中性子源モデルでは、1 パルスあたりの高速中性子発生数は KENS の 1/17 程度であるが、変換効率が約 8 倍高いため、熱・冷中性子のピーク強度では KENS の 1/2 程度の値が得られる見込みである。KURRI 中性子源モデルのターゲット、減速材の寸法をさらに最適化すると、ピーク強度は若干増加する可能性はあるが、解析モデルでは中性子ビーム孔の開口部を最小限しかとっていないため、冷減速材冷却のための配管の取り回しも考慮していないため、この値は得られるピーク強度のほぼ上限と考えるべきであろう。なお、KURRI モデルの方がピーク強度が小さいにもかかわらず、時間平均中性子束は KENS よりも若干大きくなっている。これはデカップラの有無による中性子パルス幅とパルスレールの寄与の違いに起因し、中性子強度の増大よりむしろパルス特性の劣化と見た方がよいと考える。

表 1 1 中性子源特性の比較まとめ

	KURRI 中性子源モデル(*)	KENS
中性子ピーク強度(1/cm ² /s)	1.4×10^{13}	3.1×10^{13}
パルス幅(μs)	220	100(**)
時間平均中性子束(1/cm ² /s)	7.0×10^{10}	6.1×10^{10}
中性子の最確エネルギー(meV)	7	3
陽子エネルギー(MeV)	150	500
陽子時間平均電流(μA)	5	6
周波数(Hz)	10	20
陽子加速器出力(kW)	0.75	3
中性子 Yield	0.66	19
1 パルスあたりの高速中性子発生数	2.1×10^{12}	3.6×10^{13}
変換効率 η	6.7	0.86

(*) : KURRI 中性子源モデル各部寸法 : W ターゲット : 直径 4cm, 厚さ 1.5cm, 前置減速材 : 3cm × 6 cm × 6cm, 冷減速材 : 10cm × 6 cm × 6cm, Be 反射体 : 80 cm × 80cm × 80cm.

(**) : 固体メタンの減速特性[2]から推定.

■ 参考文献

- [1] Y. Ikeda, Neutron Technical Advisory Committee Meeting 2002.10.28-30 資料から抜粋. <http://j-parc.jp/MatLife/ja/committees/ntac/ntac1/documents/I-04-Ikeda.pdf> を参照.
- [2] 鬼柳善明, 「中性子による計測と応用」 p38, 日本アイソトープ協会編, 丸善, 1999.

6. 5 中性子照射用ターゲット（田中）

この節では連続中性子照射用のターゲット及び減速体系の検討結果について報告する。中性子発生ターゲットには 30MeV 以下の陽子入射による核反応を用いたものと、30MeV 以上の陽子入射による核破砕反応を用いたものがある。ここでは連続中性子源に必要とされている熱中性子束 $>10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$ および熱外中性子束 $\sim 10^9(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$ を実現可能な加速器電流及びエネルギーの観点から、30MeV 以下の陽子を用いた反応のみについて説明する。

表 1 2 に代表的な 30MeV 以下の陽子を用いたターゲットの特性について示す。

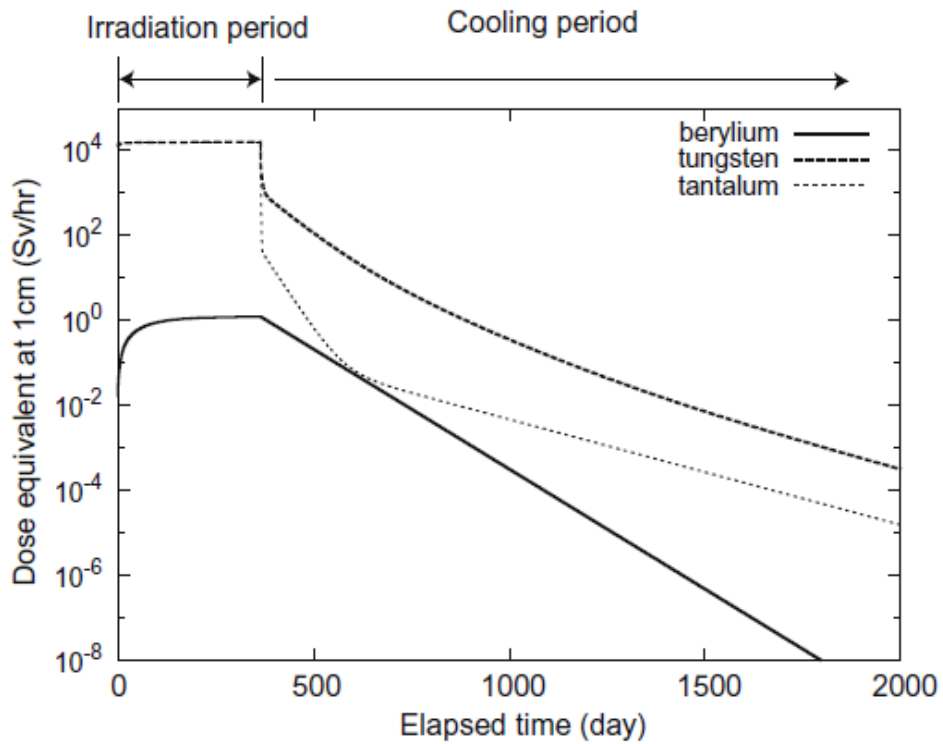
表 1 2 30MeV 以下の陽子を用いたターゲットの特性

Reaction	Proton Energy E_p	Yield (Neutron/ Proton)	Melting	Conductivity (W/m/K)	Neutron Energy	Moderator Size
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	2.5	1.46×10^{-4}	180	84.7	0.1~0.5	小
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$	4	1.6×10^{-4}	1278	201	Epに依存	大
${}^9\text{Be}(p,xn)$	30	3.0×10^{-2}	1278	201	Epに依存	大
$\text{Ta}(p,xn)$	30	2.0×10^{-2}	3017	57.5	Epに依存	大

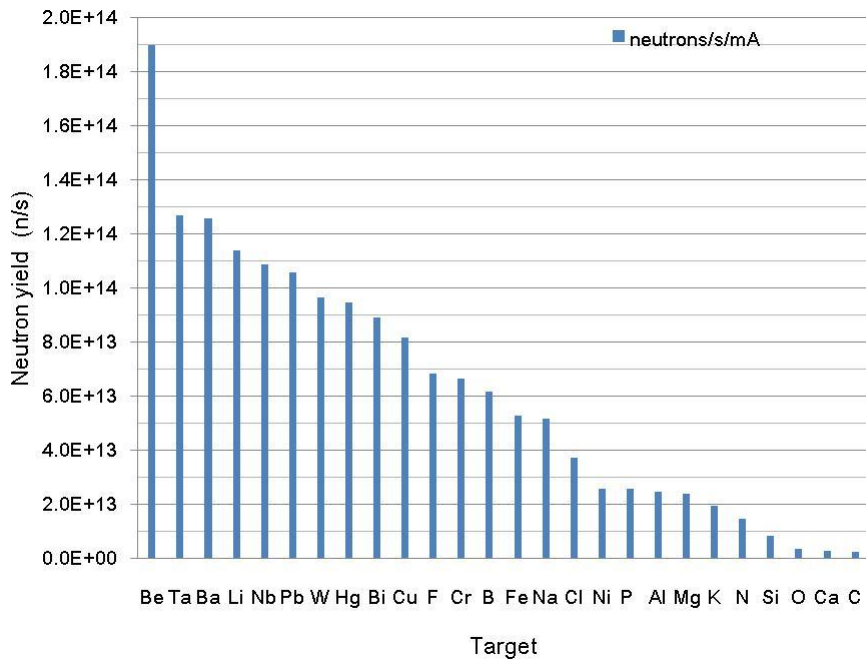
陽子エネルギーが低い場合、陽子 1 個当たりの中性子発生数は少ないが、発生するエネルギーが低いため、熱および熱外中性子を発生させるための減速体系の大きさが小さくなる。一方陽子エネルギーが大きくなるに従って、発生する中性子のエネルギーも大きくなり、減速体系が大きくなる。

中性子発生ターゲットとしては、Li、Be、Ta、W が候補として挙げられる。熱中性子束 $10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$ を達成するためには、ターゲット位置で約 $10^{14}(\text{n}/\text{s})$ の中性子強度が必要となり、Li や Be と数 MeV の陽子を用いた中性子源に必要な陽子電流は 100mA 程度となる。ターゲットでの熱付加が数百 kW となり、低い融点を有する Li ではターゲットの除熱が困難となる。一方、Ta などの重核を用いた反応では融点が高いというメリットがあるが、照射されたターゲットの放射化が課題となる。第 5 4 図に 1mA の陽子を週に 5 時間照射し、1 年間連続運転したときの Be、Ta、W ターゲットの放射化の時間経過を示す。運転期間中の Ta 及び W ターゲットの 1cm 線量等量は Be の 4 桁高く、残留放射能の半減期も長いため、ターゲット交換時に工夫が必要となる。

また第 5 5 図に示すように、Be は 30MeV の陽子を入射した際に他の物質と比べて中性子発生率が高い。そこでここでは Be ターゲットの高い中性子生成率、高い融点、低い放射化といった性能に着目し、Be を中性子生成ターゲットとした。



第5 4図 陽子エネルギー30MeV、電流値 1mA、週 5 時間の条件で 1 年間運転した時の Be、W、Ta ターゲットの 1cm 線量等量



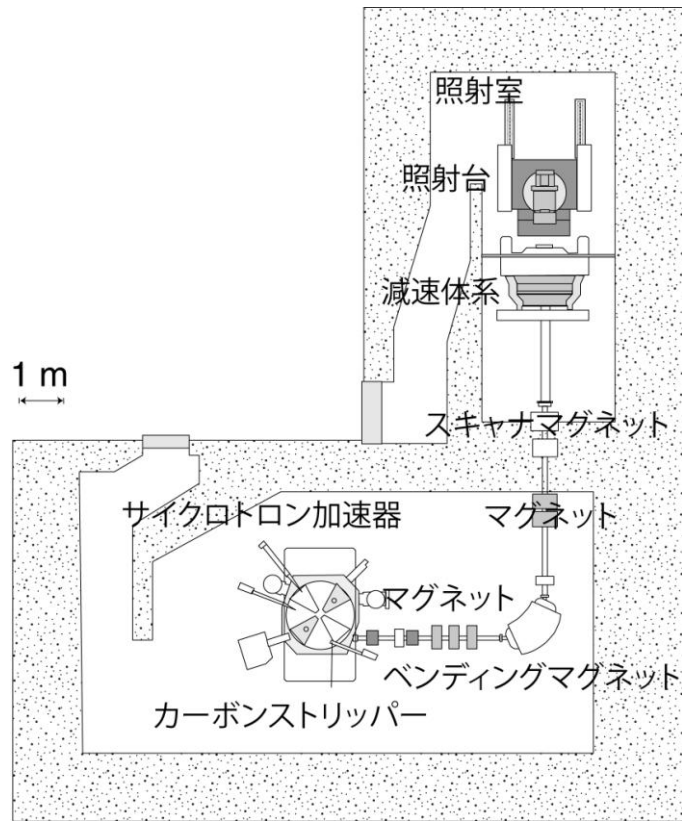
第5 5図 陽子エネルギー30MeV、電流値 1mA を入射した際の種々のターゲットに対する中性子生成率

次に減速体系の最適化について説明する。ここでは熱中性子束 $>10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$ および熱外中性子束 $\sim 10^9(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$ を満足する性能を目指して最適化を行った。最適化に際し熱中性子場の Figure of merit は熱中性子束($<0.5\text{eV}$)強度、高速中性子束($>2\text{MeV}$)の熱中性子に対する混入割合とした。一方熱外中性子場では、熱外中性子($0.5\text{eV}<E\text{n}<40\text{keV}$)強度、高速中性子束($>40\text{keV}$)の熱外中性子に対する混入割合とした。基準となる体系は、すでに京都大学原子炉実験所で開発されている中性子捕捉療法用のサイクロトロンを用いた熱外中性子源とした。

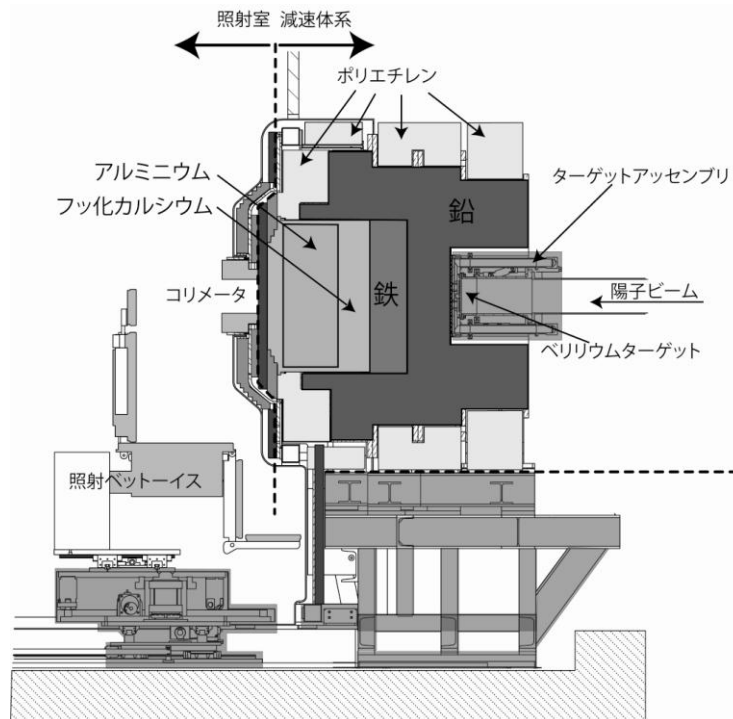
サイクロトロン熱外中性子源の概要を以下に示す。サイクロトロンベース熱外中性子源の概略図を第56図に示す。本システムは陽子サイクロトロン、ビーム輸送系、減速整形体系から形成される。第57図に熱外中性子発生のための減速整形体系の概略図を示す。減速体系の構成物質は鉛、鉄である。鉛は 10MeV 以上で 1barn 程度の $(\text{n},2\text{n})$ 反応断面積を有しており、 1MeV 以上の中性子において 1barn 程度の非弾性散乱断面積を有する。鉄は鉛よりも $(\text{n},2\text{n})$ 反応断面積が小さいが、非弾性散乱断面積が数 MeV 付近で鉛よりも高い。よってターゲット近くには鉛を配置しその後に鉄の減速体を設置した。また、ターゲット周りの鉛はターゲットから後方散乱した中性子を反射するための反射体として設置した。ターゲットアセンブリは交換時には後方に移動できる構造となっている。熱外中性子整形体系はアルミニウム、フッ化カルシウムから構成される。それは以下の理由による。アルミニウムは 27keV 、 70keV 付近に全断面積の谷があり、その部分のエネルギーを持つ中性子が他のエネルギー領域に比べて反応を起こしにくい。一方、 70keV 付近で抜けてくる中性子は高すぎて、治療効果の劣化を招くため、数 10keV 以上で共鳴断面積を有するフッ素含有の物質を加えることで 70keV 付近のエネルギーを減速させる。

フッ化カルシウムを通過して、熱外中性子領域に整形された中性子は鉛のガンマ遮蔽体を通ってコリメータへと導かれる。コリメータは 25cm 角まで拡大でき、患部の形に合わせて開口部を自由な形に変形可能である。 1.5cm 厚みの LiF 入りポリエチレンブロックで形成されている。

本検討における最適化では上記サイクロトロンベース熱外中性子源を基準体系とし、ターゲット直近に熱中性子用照射ポートを設置し、熱中性子場及び熱外中性子場の両立を目指した検討を行った。



第56図 京都大学原子炉実験所におけるサイクロトロンを用いた熱外中性子源概略図

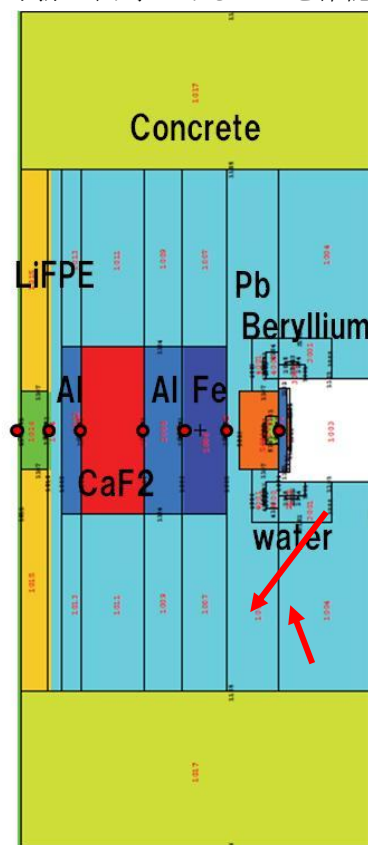


第57図 サイクロトロンを用いた熱外中性子源の減速体系概略図

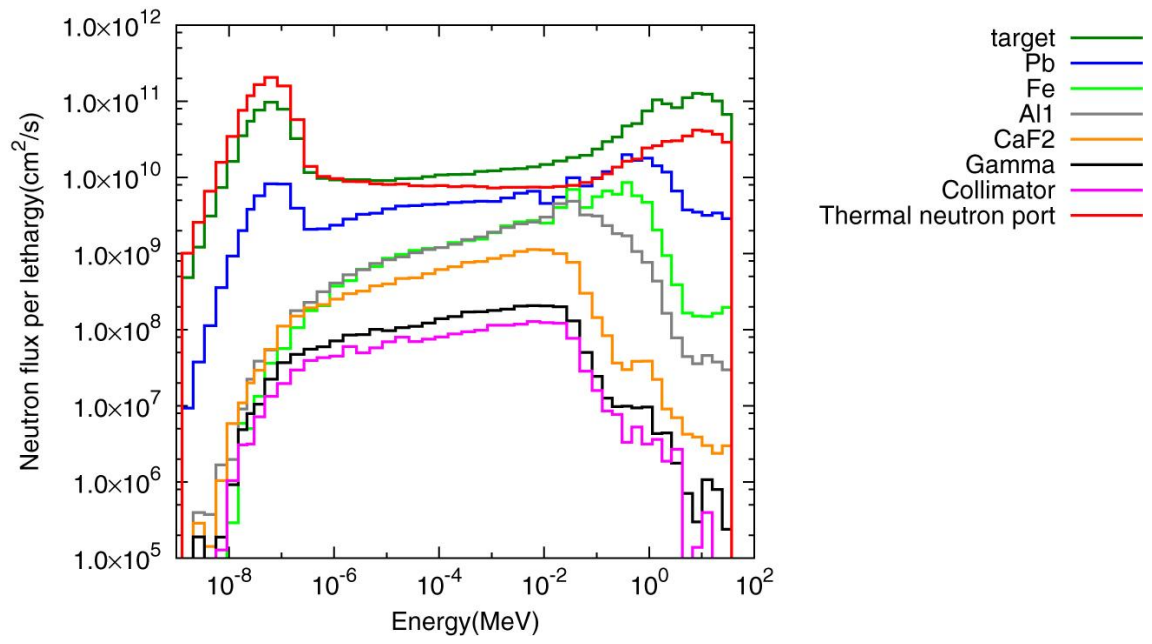
ターゲットに入射する陽子ビームの軸から 90 度方向、0 度方向に熱中性子照射場を設置した計算体系を第 5 8 図に示す。ターゲットからの高速中性子は軽水減速材によって熱中性子へと減速される。軽水減速材の周りにはベリリウム反射体を設置することで、軽水減速体内の熱中性子束を向上することができる。陽子電流を 1mA と仮定すると 90 度方向の熱中性子束は 5×10^{10} (/cm²/s) であり、熱中性子強度に対する高速中性子強度の比は 0.1 である。0 度方向の熱中性子束は 4×10^{11} (/cm²/s) であり熱中性子強度に対する高速中性子強度の比は 1 である。照射する物質によっては高エネルギー中性子によるしきい反応が熱中性子による反応と競合する場合があるため、適切な照射場を選択する必要がある。

熱中性子束強度 10^{12} (/cm²/s) 以上を達成するには陽子電流 2.5mA 以上必要であることを確認することができた。

第 5 9 図に各減速体を通じた後の中性子スペクトルを示す。ターゲットからの高エネルギー中性子は鉛、鉄によって減速され、さらにアルミ、フッ化カルシウムによって熱外中性子エネルギーへと減速される。さらに、熱外中性子へと減速された後に、フッ化リチウム含有ポリエチレンで作成されたコリメータによって成形される。陽子電流 1mA の条件で、コリメータ出口での熱外中性子束強度は 1.6×10^9 (/cm²/s) となり、中性子捕捉療法などでの使用に供することが可能である。熱外中性子に対する高速中性子の比は現行のサイクロトロンを用いた熱外中性子源と同等であることを確認した。



第 5 8 図 熱中性子照射場を有する熱外中性子照射設備の計算体系



第5 9図 減速体系内の各位置における中性子スペクトル

5. 6. 1 はじめに

複合原子力科学推進小委員会では、新たな中性子源として加速器を用いた加速器中性子源の新規導入を検討しているが、これを用いた中性子照射設備および付帯する実験設備を格納するためには新たな建屋が必要となる。その理由は導入を計画している加速器中性子源によって発生する中性子の遮へい能力をもち、かつ中性子光学実験で必要とされる中性子導管を設置するための面積をもつような建屋が、現在の実験所内に存在しないためである。そこで、上記委員会で目指している実験研究の実施が可能な新たな建屋の建築を計画した。本章では、建築計画の目指すべき方向性や具体的な計画図面などについて記述するが、まず本建築計画の位置付けについて以下に述べる。

当実験所では将来計画として「熊取アトムサイエンスパーク構想」が掲げられており、この構想の中には加速器（FFAG 加速器、BNCT のためのサイクロトロン加速器）が設置される総合実験棟としての「イノベーションリサーチラボ」と、所内外の研究者の研究スペースおよび放射性管理区域をもつ「コラボレーションリサーチラボ」の建設が計画されていた。当初の計画では後者のコラボレーションリサーチラボは、前者のイノベーションリサーチラボに設置されている加速器施設とは直接的な関係は少なく、実験所全体における研究計画を推進するために必要な建屋として計画されており、概算要求において毎年申請がなされてきた。しかし、複合原子力科学計画を推進するにあたって、コラボレーションリサーチラボの役割をさらに明確なものとし、加速器中性子源を用いた研究に直接関わる研究施設として再検討を行うこととした。その結果、コラボレーションリサーチラボは新たな加速器中性子源の導入計画における中性子照射施設および付帯する実験研究のための建屋として新たに計画を立案することとなった。

5. 6. 2 建設場所

コラボレーションリサーチラボの果たすべき役割としては、まず1) 加速器を利用した実験研究が可能な実験環境、および2) このような実験研究を行う所内外の研究者のための優れた研究環境を提供することが挙げられる。1) に関しては、建屋内に加速器中性子源の整備、加速器中性子源を利用した実験スペースの整備、加速ビームを直接用いた実験スペースの整備が必要であり、2) に関しては、所内外の研究者によって構成されるプロジェクト研究を実施するために必要な研究スペースや会議室、非管理区域となる各種実験室の整備が必要となる。このような目的を達成するために、コラボレーションリサーチラボは、中性子源のドライバーとして導入される加速器が設置される予定であるイノベーションリサーチラボに隣接して建設する必要がある。また、加速器の設置はイノベーションリサーチラボの1階にある加速器本体室および照射ホールが有力であるため、加速器から出射されるイオンビームを有効に活用するためには、コラボレーションリサーチラボの建設場所としてイノベーションリサーチラボの東側のグラウンドが最適であると考えた。第60、61図にコラボレーションリサーチラボの建設を検討している場所を示す。



第60図 コラボレーションリサーチラボ建設候補場所（実験所内での場所）



第61図 コラボレーションリサーチラボ建設候補場所（詳細）

5. 6. 3 コラボレーションリサーチラボ建屋の構造

次に、建屋の構造および規模の検討を行ったが、この際の基本コンセプトとして以下の設備を保有することを基本的な条件とした。

A. 管理区域内設備

- A-1 イノベーションリサーチラボからの加速器ビーム輸送・導入のための設備
- A-2 中性子源設備、および中性子利用実験設備
- A-3 パルス中性子源設備およびパルス中性子利用設備
- A-4 加速器ビームを直接利用する実験設備
- A-5 非密封の放射性同位体が使用可能なホットラボ実験室
- A-6 加速器ビームの使用施設および放射性物質の取り扱い施設としての付帯設備

B. 非管理区域設備

- B-1 加速器、中性子源、放射線管理区域などの管理室
- B-2 非管理区域における実験の準備を行うための実験室
- B-3 プロジェクト研究を行うための研究スペース（会議室などを含む）
- B-4 共同利用者のための研究スペース

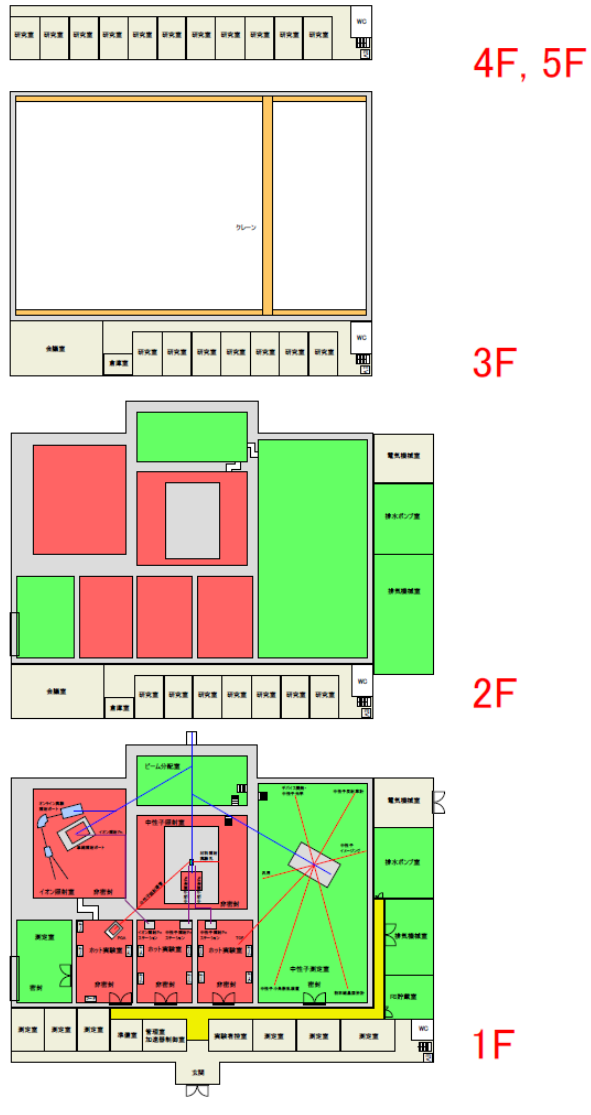
具体的には、A-1 はイノベーションリサーチラボからの加速器ビームを建屋に導入するための設備であり、A-2 は加速器ビームによってつくられる大強度の中性子源を用いた照射実験を行うための設備であり、A-3 は A-2 と比べて強度が低いパルス状の時間構造を持つ中性子ビームを発生させ実験に用いるための設備であり、A-4 は加速器からのビームを中性子に変換することなく直接利用するための設備である。以上はイオンビームや中性子を直接利用するための設備であり、A-5 は中性子照射実験もしくは加速器ビームの照射実験によって生じる放射性同位元素を安全に取り扱うための実験設備である。A-6 は上記の設備を安全に運用するために必要な装置類（電源設備、排水設備、排気設備）を設置するための設備である。

非管理区域に設置を計画している B-1 は、加速器ビーム、中性子発生装置、放射線管理区域を安全に運用するために必要な管理室であり、B-2 は管理区域で行う必要のない実験準備などを行うための実験室、B-3 は設置される実験装置を用いたプロジェクト研究を推進するための研究スペースであり、会議室などもこれに含まれる。B-4 は将来において所外の一般の研究者による実験研究を行うことを想定した共同利用実験のためのスペースである。

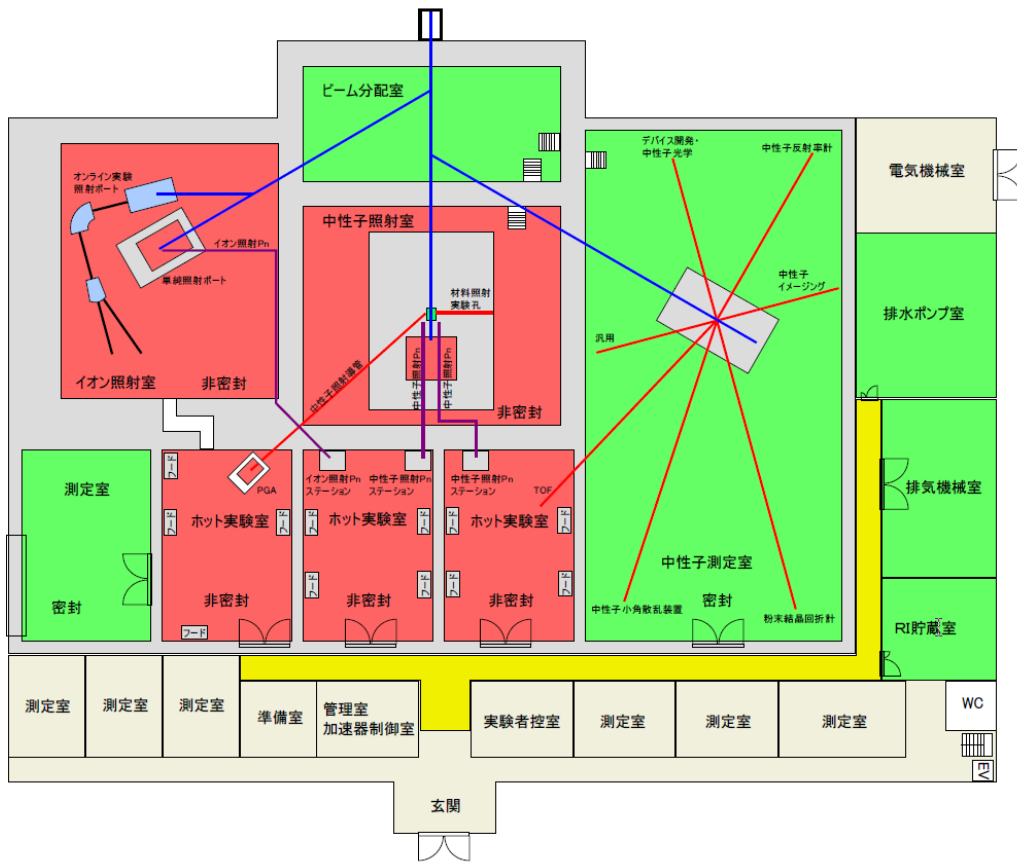
これらの基本的な要件を勘案して建屋の図面を検討し、第2回、第3回の複合原子力推進小委員会・所内検討会、および所外の研究者も参加して2010年9月に行われた「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップにて提案を行った。以下にこれらの検討会で提案した図面案について紹介する。

5. 6. 3. 1 建屋図面案（1）

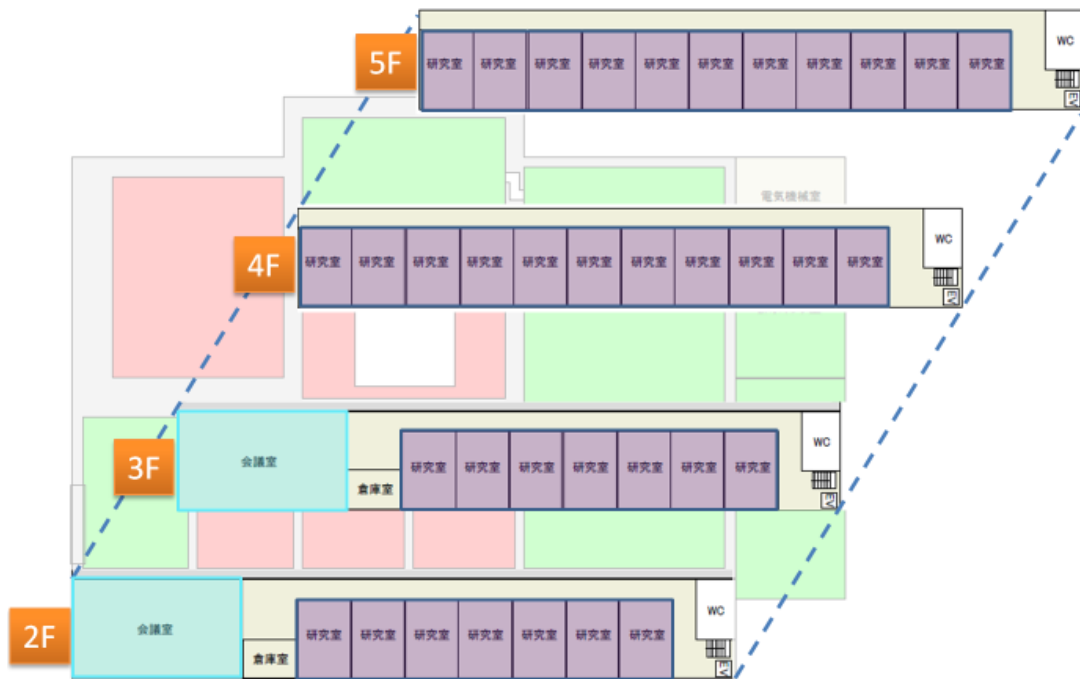
2010年6月に開催された第2回複合原子力推進小委員会・所内検討会において提案したコラボレーションリサーチラボの建屋図面案を第62図に示す。この時点では、先に示したA-1~6およびB-1~4の要件について規模などに制限を設けず、実験研究に必要であると考えられる設備をすべて導入することを前提として図面案を作成し提案した。この提案図面においては、管理区域の実験室として中性子照射室（中性子源設備および中性子利用設備）、中性子測定室（パルス中性子利用設備）、およびイオン照射室（イオンビーム利用設備）を中心として、非密封放射性同位体を用いるためのホット実験室が3室と、密封放射性同位体を用いた実験に用いられる測定室が配置しており、A-6の保全設備も実験室に隣接して配置した。また、非管理区域エリアの1階には種々の管理室や実験室が、2~5階には研究室と会議室を配置した。第63、64図に1階および2~5階の拡大図面を示す。



第6 2 図 第2回所内検討会で提案した図面案（全体図）



第63図 第2回所内検討会で提案した図面案（1階）

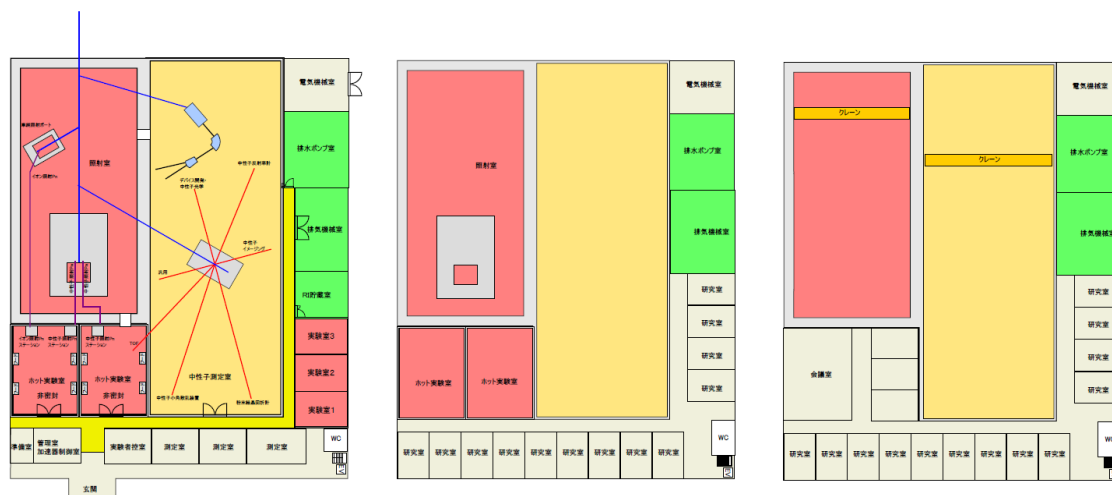


第64図 第2回所内検討会で提案した図面案（2～5階）

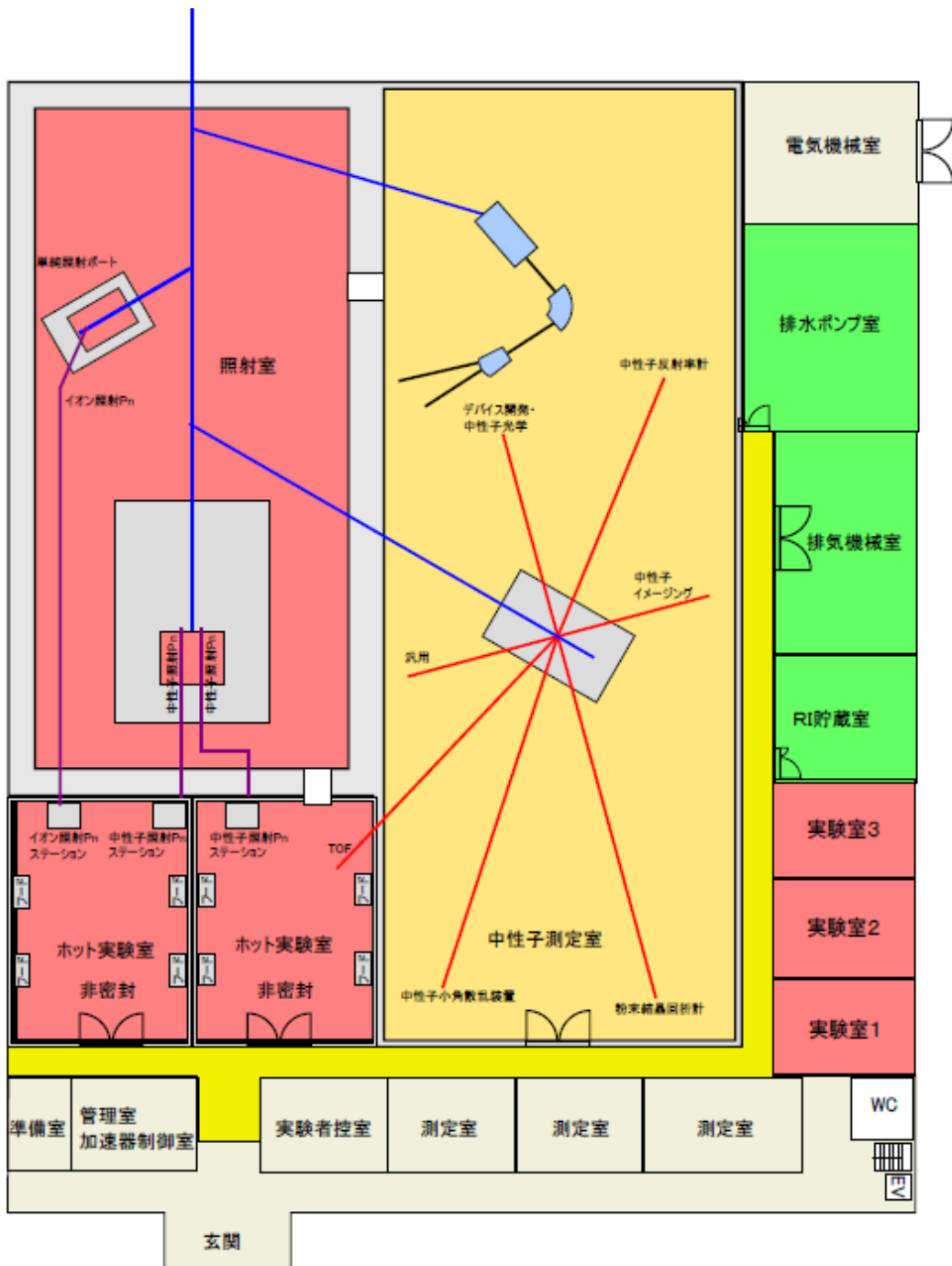
5. 6. 3. 2 建屋図面案（2）

第2回複合原子力推進小委員会・所内検討会における参加者からの図面案に対する意見をもとに、小委員会において建屋図面に対してさらなる検討を進め第2案を作成した。検討の主な目的は規模の縮小である。第1案の提案にあたっては、前節の説明で述べたとおり考えられる設備をすべて導入することを前提として図面を作成したが、第2案の策定にあたっては、使用頻度が少ないと考えられる設備や研究目的が現段階では明確でないと考えられる設備については統合もしくは削除することにより規模を縮小し、最低限必要であると考えられる設備に絞って図面案を作成した。

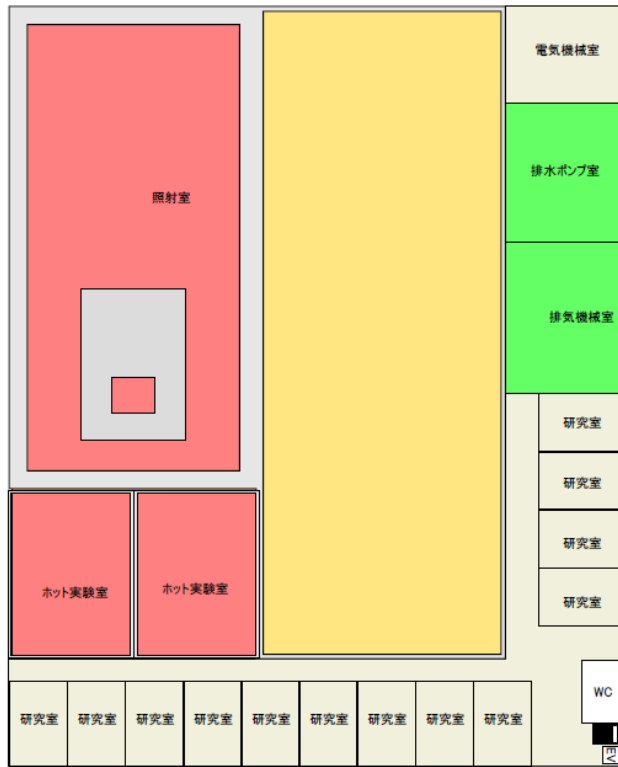
具体的には厚いコンクリート遮へい壁を必要とするビーム分配室と中性子照射室、イオン照射室を統合してひとつの実験室とすることで必要とされる厚いコンクリート壁を約半分とし、ホット実験室は用途を限定して3室から2室へ削減し、密封放射性同位体を用いるための測定室は中性子測定室に統合することで実験エリアの面積を約75%とし、かつ実験エリア全体をより単純な構造とした。このことで、第1案ではクレーンの設置に困難が生じていたが、第2案においては中性子照射室と中性子測定室に別々にクレーンを設置することが可能な構造となった。また、管理区域エリアの縮小に伴い、非管理区域の研究スペースも約30%縮小させた。これらの検討結果を、第2案として2010年9月に開催された第3回複合原子力推進小委員会・所内検討会において提案した。この図面案（全体図）を第65に示す。また、各階の詳細図面を第66、67、68図に示す。



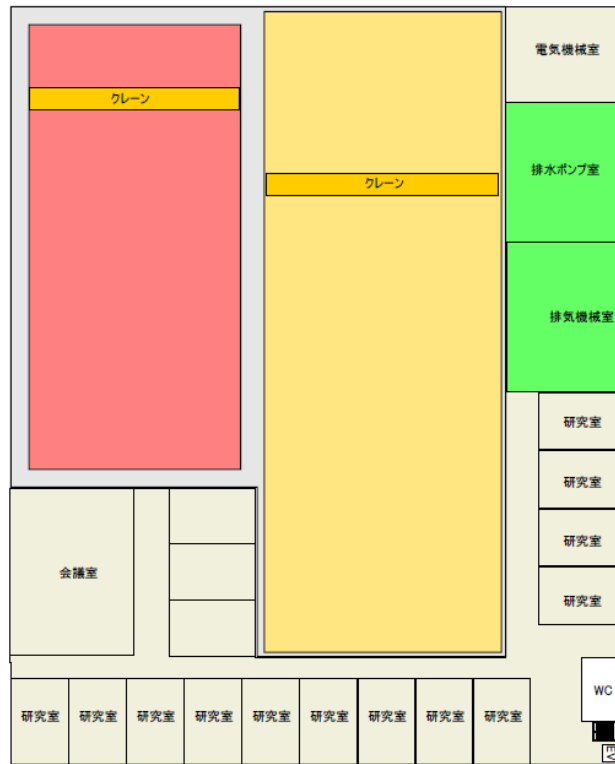
第65図 第3回所内検討会で提案した図面案（全体図）



第66図 第3回所内検討会で提案した図面案（1階）



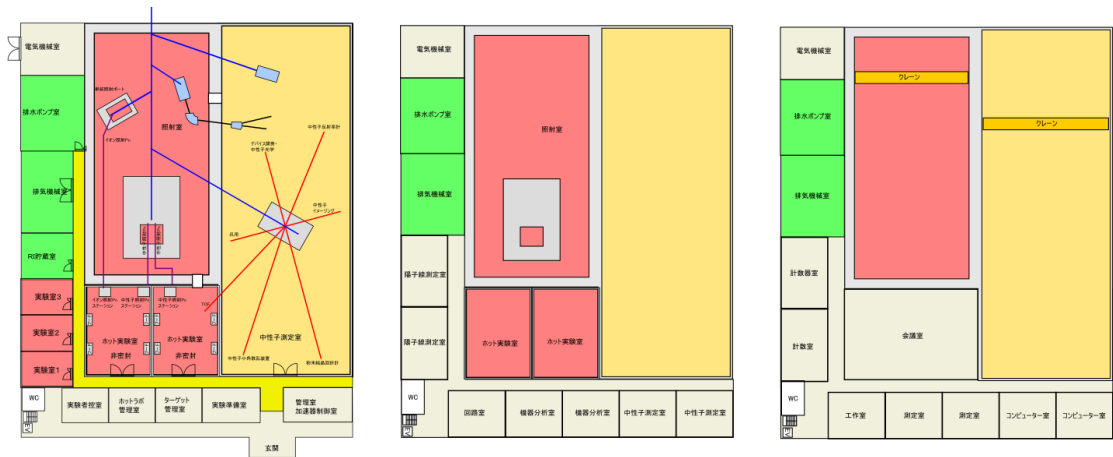
第67図 第3回所内検討会で提案した図面案（2階）



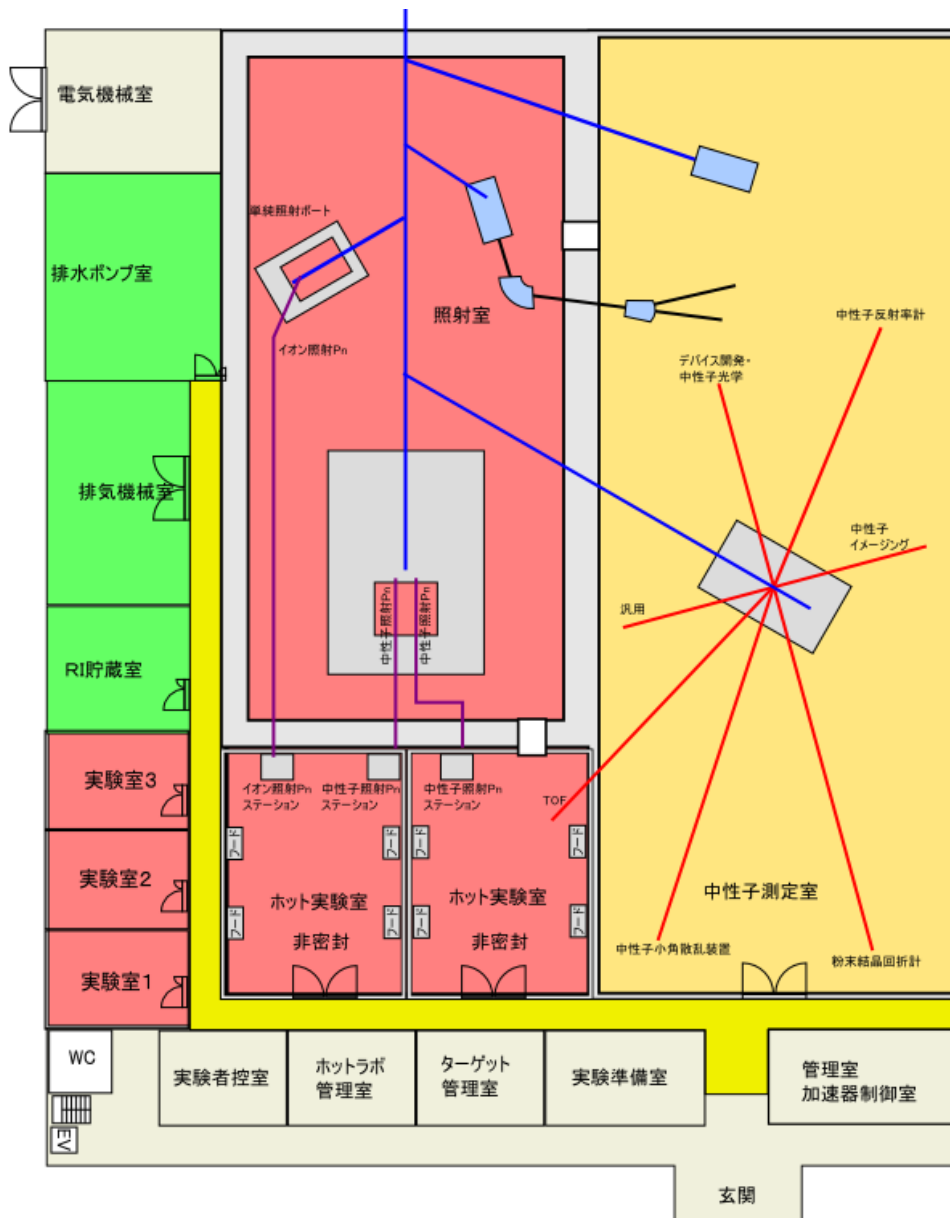
第68図 第3回所内検討会で提案した図面案（3階）

5. 6. 3. 3 建屋図面案 (3)

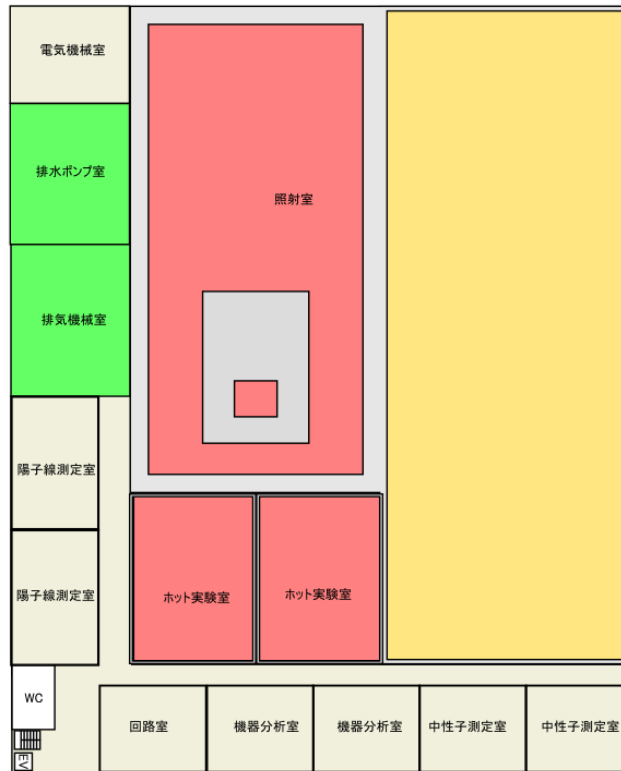
第3回の所内検討会では第2回の所内検討会における建屋図面の提案に対する意見を反映させた図面案を提案したため、全体図面に対する大きな変更を要求するような意見はみられず、実際に建屋に装置を導入したり実験を行ったりする際のより具体的で細かな変更が必要となる意見が提案された。例えば、第2案においては中性子測定室が（中性子およびイオンビームの）照射室と保全設備（電機機械室、排水ポンプ室など）に囲まれる構造となっていたが、中性子測定室に設置される中性子導管は将来的に延長することでより高精度な測定ができる可能性があるため、中性子測定室を将来的な拡張が可能な構造に変更することが提案された。第3案の検討にあたってはこれらの提案を考慮し、2010年10月に開催された「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップにおいて第3案として提案した。また、この図面案を提案するにあたり、非管理区域エリアの研究スペースの具体的な使用目的をより明確にするために、各部屋の名称をより具体的なものに変更した。この図面案（全体図）を第69図に示す。また、各階の詳細図面を第70、71、72図に示す。



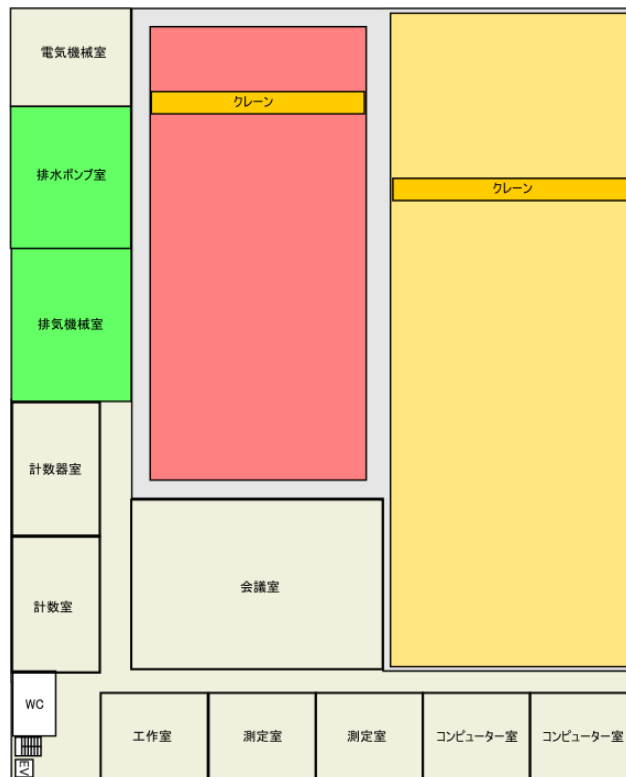
第69図 「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップで提案した図面案（全体図）



第70図 「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップで提案した図面案（1階）



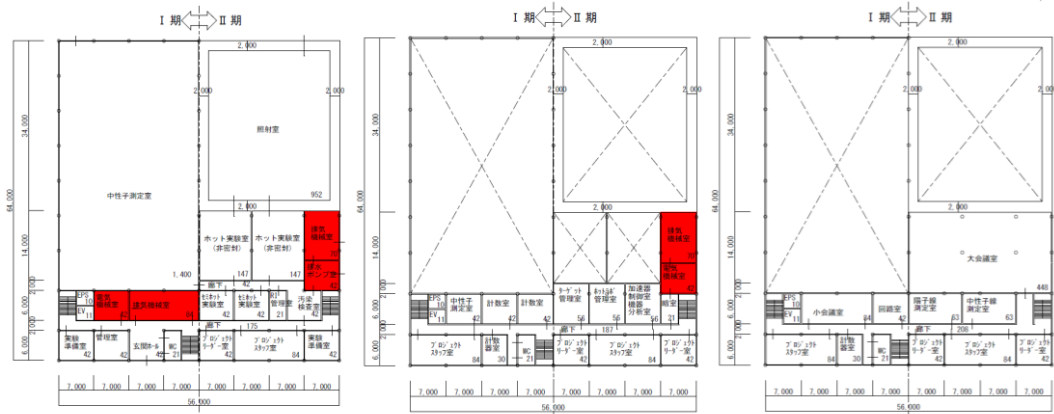
第71図 「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップで提案した図面案（2階）



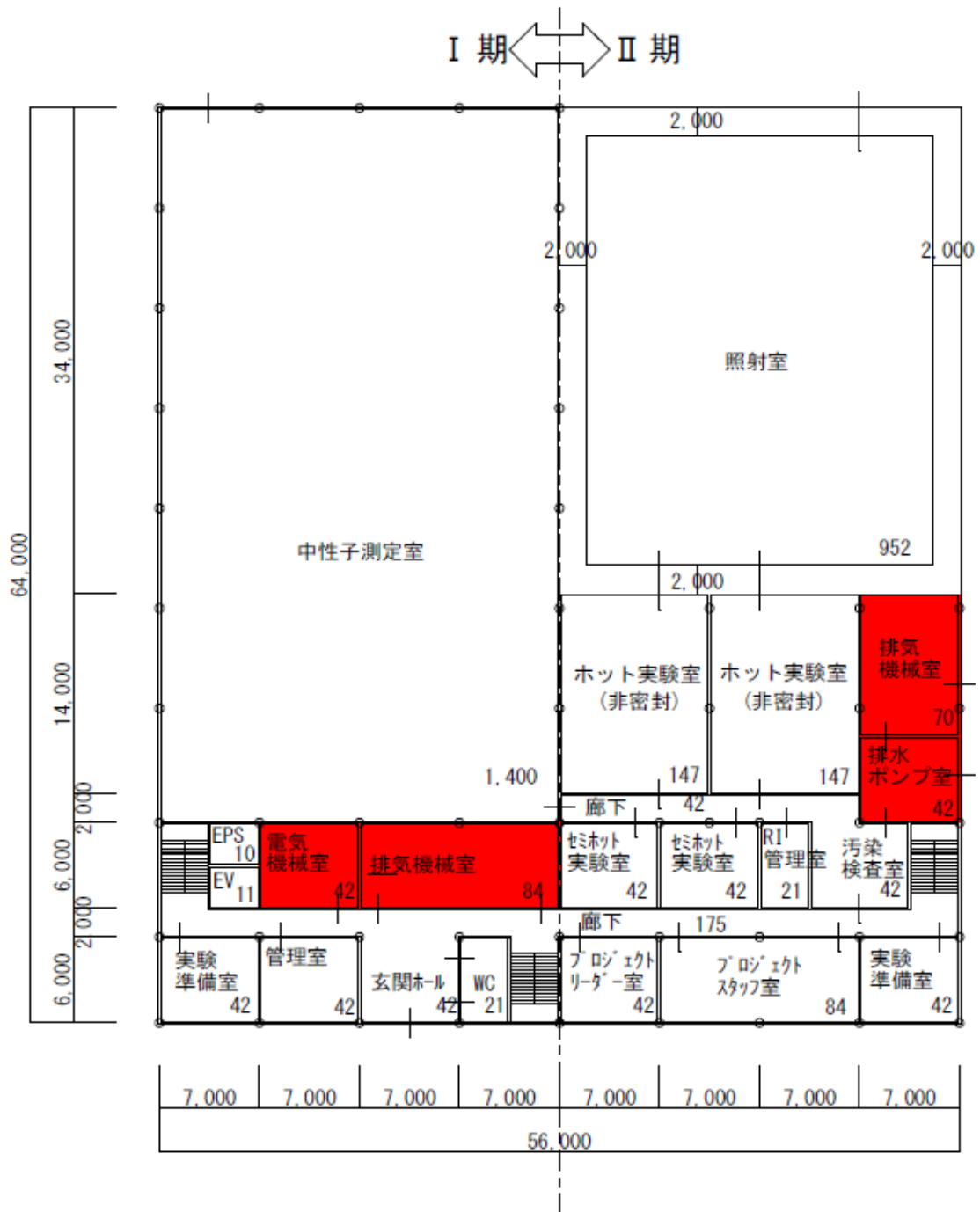
第72図 「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップで提案した図面案（3階）

5. 6. 3. 4 建屋図面案（4）

前述の3回にわたる所内外への建屋図面の提案に対する意見をまとめ、現段階での最終的な図面案を作成した。基本的な考え方は「KURの利用と新中性子源の検討」ワークショップでの提案から大きな変更はないが、建屋を建築する際の予算や加速器ビームを用いた実験の全体計画などを検討し、建屋の建築をI期とII期の2段階に分けて進めることができるように建屋構造を検討し直した。その結果、I期ではFFAG加速器からのパルスビームを用いた中性子パルスビーム利用実験のための中性子測定室に関連する施設を建設し、II期でサイクロトロンやリナックといった大強度加速器からのビームを用いた高線量中性子利用実験のための照射室に関連する施設を建設することとした。また、建屋の建築位置や配置についても詳細な検討を行い、第71図の照射室側（向かって左側）と中性子測定室側（右側）を入れ替えた。以上の検討の結果作成したコラボレーションリサーチラボの現段階での図面案（全体図）を第73図に示す。また、各階の詳細な図面を第74、75、76図に示す。建設位置については、第77図に建屋のグラウンド内での位置を示しており、第78図に実験所全体図における建築位置を示す。

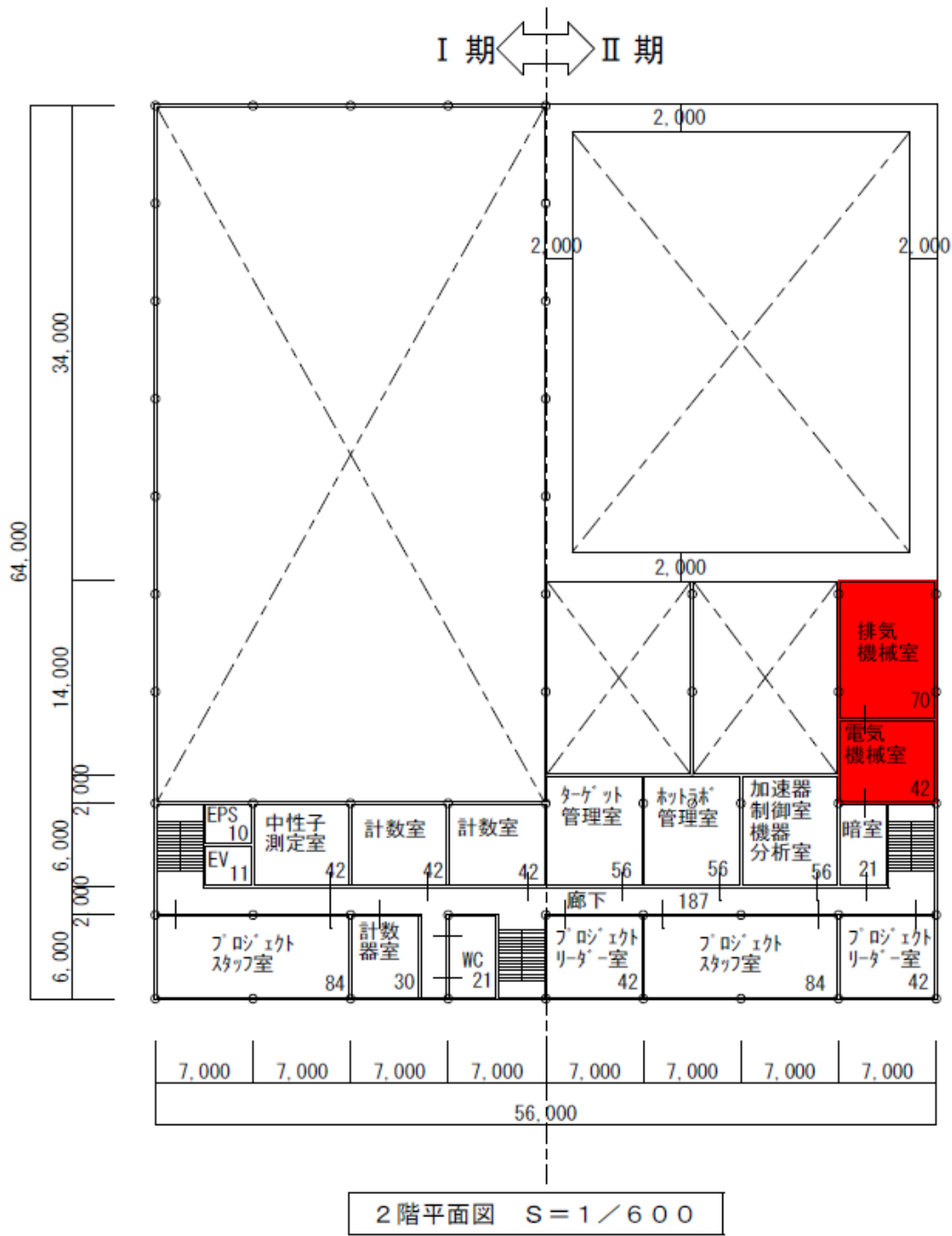


第73図 コラボレーションリサーチラボ図面案（全体図）

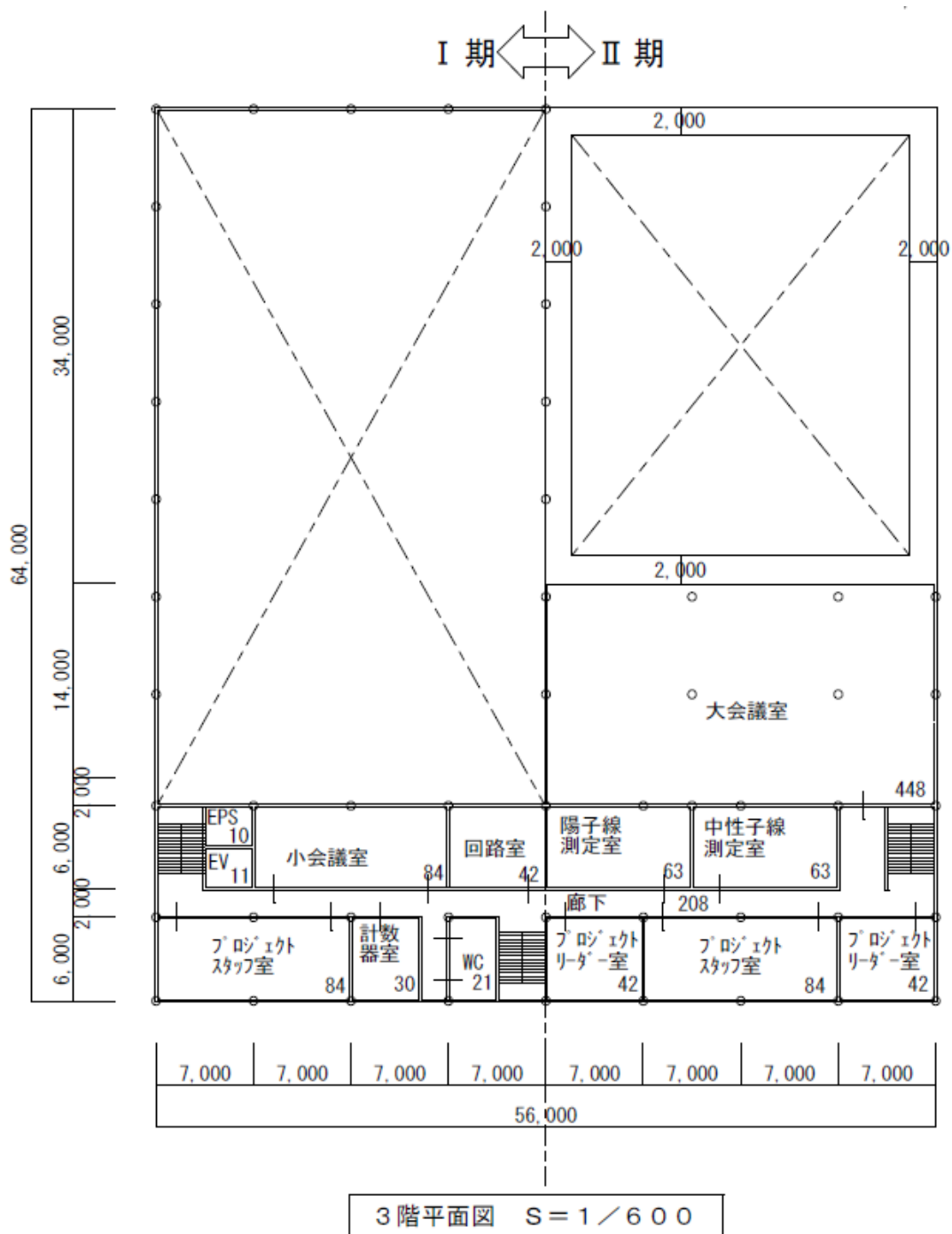


1階平面図 S = 1 / 600

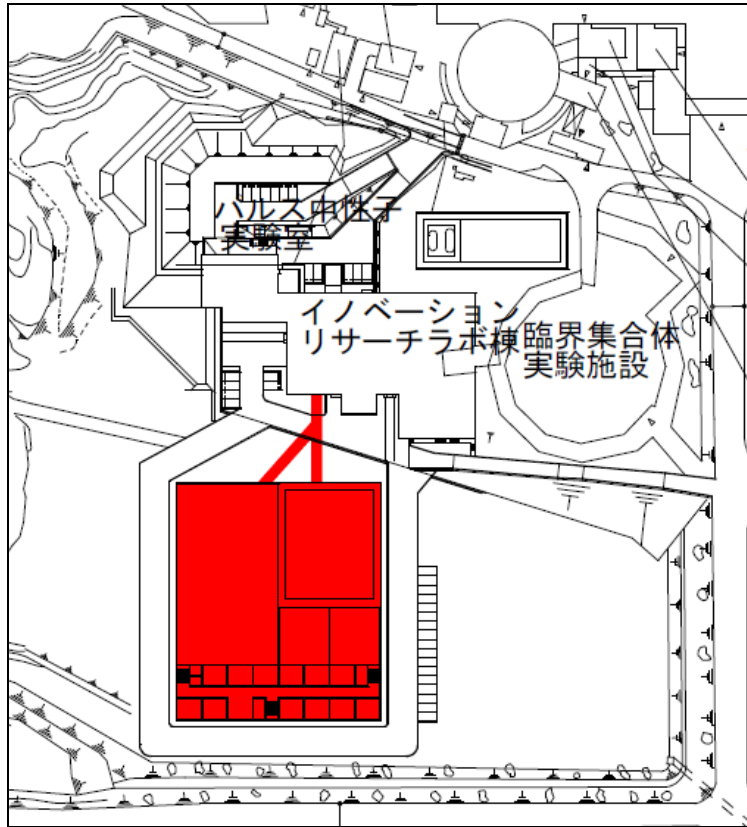
第74図 コラボレーションリサーチラボ図面案 (1階)



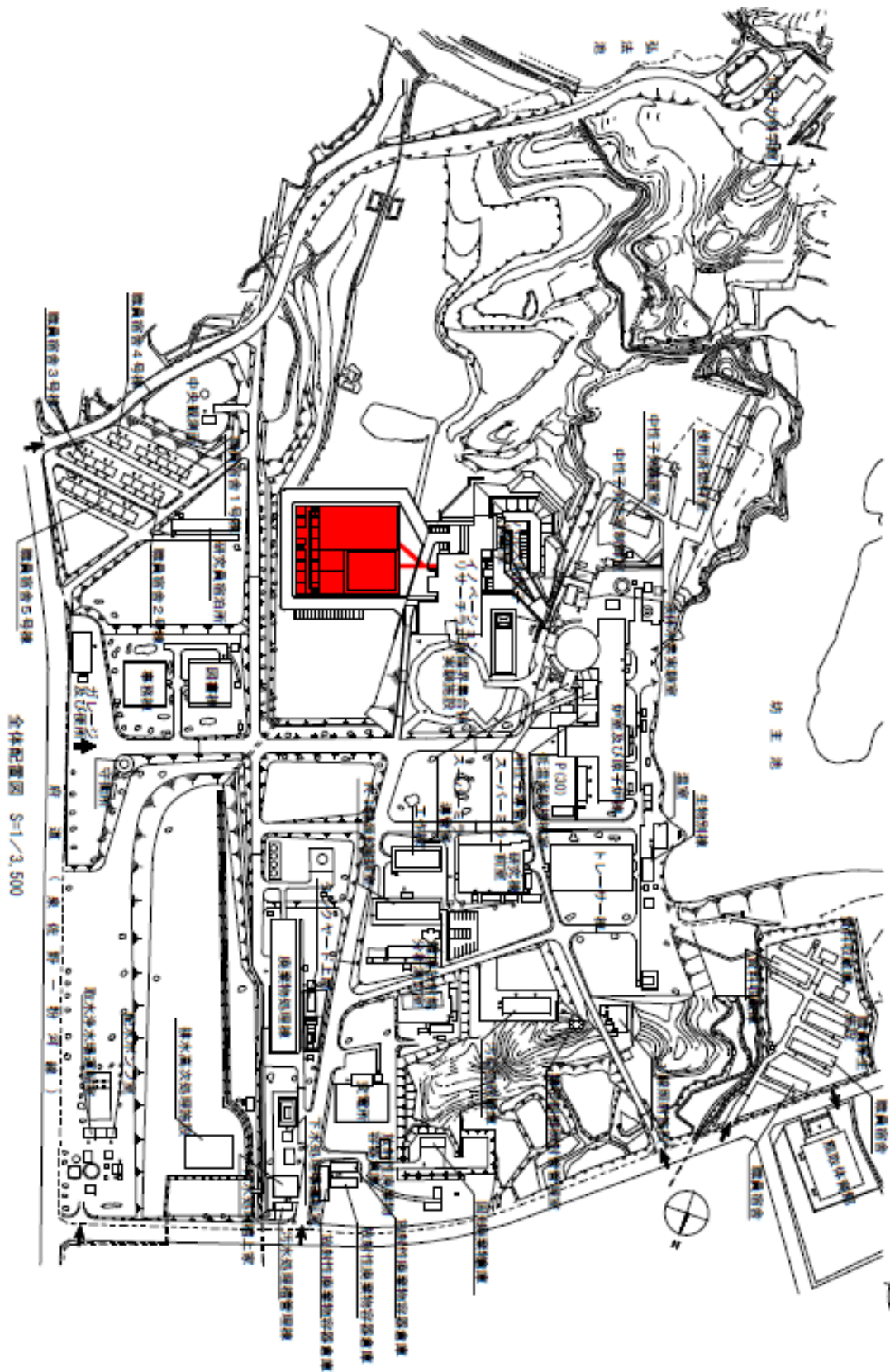
第75図 コラボレーションリサーチラボ図面案（2階）



第76図 コラボレーションリサーチラボ図面案 (3階)



第77図 コラボレーションリサーチラボの建設位置 (グラウンド)



第78図 コラボレーションリサーチラボの建設位置（実験所内での位置）

5. 6. 4 今後の検討課題

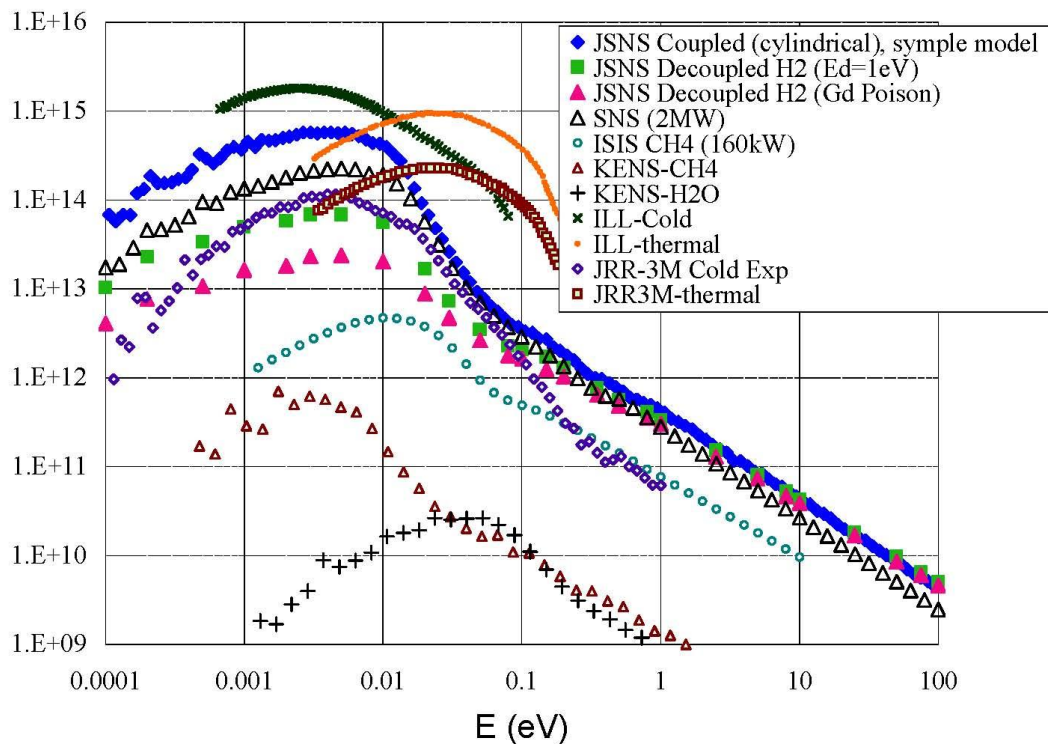
本研究計画では大強度の中性子を発生させ利用することが想定されているので、建屋の建築を計画する際には、外壁や天井のコンクリートの厚さや排気能力などに対する放射線管理のための見積りが必要である。しかし、導入する加速器の種類、出射されるビームの種類、エネルギー、電流量、および中性子源で発生する中性子のエネルギースペクトルや線量、モデレーターのパフォーマンスなどは検討段階にあるため、現段階では確定できない。今後、これらの主要な装置の選定が進めば、それらのスペックに応じた遮へい壁の厚さなどを見積もり、図面に反映させる必要がある。また、コラボレーションリサーチラボにおいて実験を行う研究テーマの選定状況によって実験室の規模や配置を再検討する必要がある。また、実施される実験の規模に応じて必要なインフラの整備計画なども検討を行う必要がある。

7 新加速器中性子源を用いた研究提案

7. 1 パルス中性子利用

7. 1. 1 加速器パルス中性子利用の特徴 (杉山)

ビーム利用を前提とした中性子源は、「原子炉における核分裂の連鎖反応を用いる場合」(原子炉中性子源)と「加速器による高エネルギー荷電粒子による核破砕現象(場合によっては核反応現象)を用いる場合」(加速器中性子源)に大別できる。原子炉中性子源の特徴は、時間的に連続して中性子が発生する点である。したがって、その長所は時間平均強度が高いことである。一方、短所は、一般的な分光器では特定波長を利用するため、使用波長を切り出すモノクロメータを必要とし、全波長帯域を利用する事は出来ない。加速器中性子源の特徴は、破砕ターゲットに入射する荷電粒子ビーム(一般的には陽子ビーム)をパルス化する事で、発生する中性子ビームも連動して時間的にパルス化することが出来る点である。以降、この加速器中性子源に関しては、このパルス型にのみ注目する。パルス中性子源の最大の特徴は、中性子の発生時刻を知ることが出来るので、分光器において到着した時刻を測定すれば、(中性子の発生位置と分光器における検出器の距離は分かっている)その中性子のエネルギー(=波長)を知ることが出来る点である。(これを飛行時間法=Time of Flight, TOF 法と言う)この事は、パルス中性子源を用いた分光器では、モノクロメータを必要とせず、更に入射ビームのほとんどを使う事が出来ると言う利点をもたらす。したがって、一般的に言って、加速器パルス中性子源の出力は、原子炉中性子源に比べて小さく、それに応じて時間平均中性子強度は低いが、中性子の利用効率は遥かに高い。(例えば、世界最強強度の原子炉中性子源である ILL の研究用原子炉 HFR の出力は、50MW であるが、j-prac の計画最高出力は、1 MW である。)



第79図 各種中性子源施設における中性子スペクトルの比較

7. 1. 2 中性子小角散乱 (杉山)

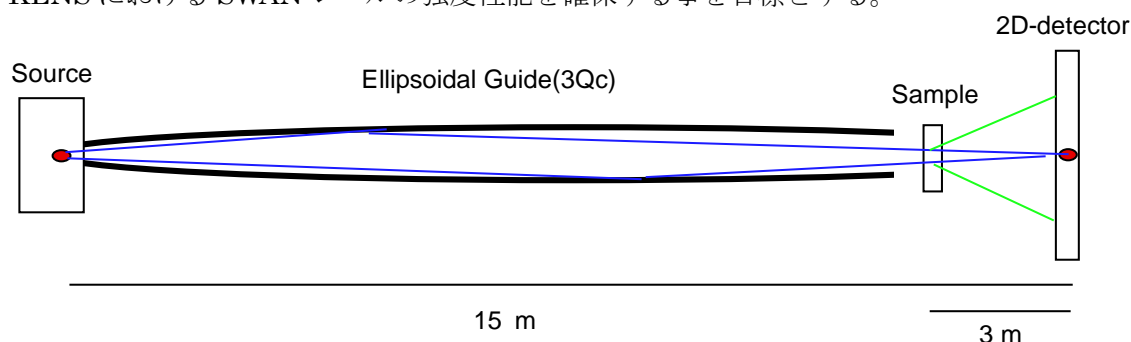
中性子小角散乱は、金属材料から合成高分子・生体高分子までに及ぶ様々な物質のナノスケールの構造情報を非破壊(溶液中でも可)得る事が出来る手法である。したがって、分析利用を主眼とした材料開発等の共同利用から、タンパク質の構造解析等の学術的基礎研究までの多くのユーザが期待できる分光器である。

一般的に、同じスケールの構造を観測する場合、散乱角と入射ビームの波長は相反する関係にあるので、特に散乱角が小さい「小角散乱」では、散乱角を大きくして、測定スケールを大きくするために、なるべく長い波長帯域を使う事が望ましい(2-10Å)。また、小角散乱では、分解能を上げるために、平行度の高いビームが要求される。このため、中性子源から4πの立体角に放射される中性子から平行ビームを切り出す事による強度の減少が大きい。そこで、新分光器では、基本的コンセプトとして

1. 長波長帯域における強度の利得が大きなモデレータに接続する
2. 線源から分光器までのビーム輸送を工夫し、減衰を最小限に抑える。

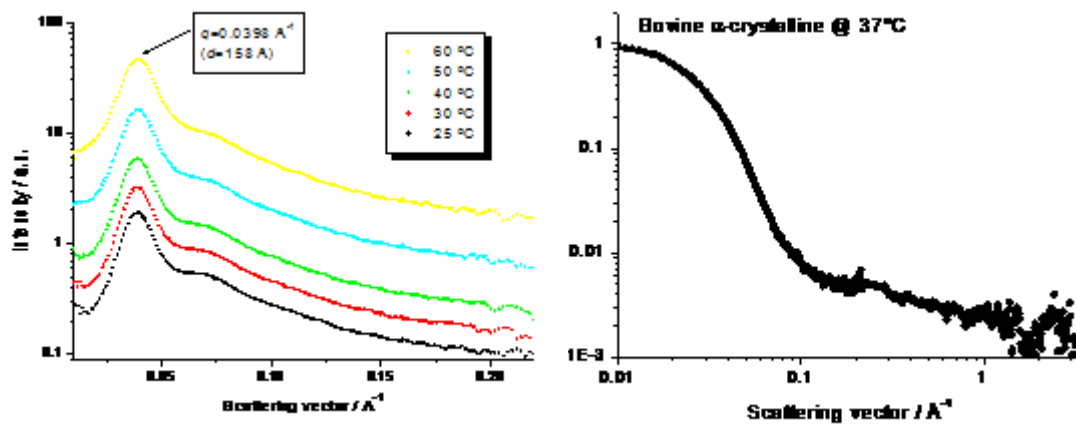
ことを考える。

1に関しては、ISISにおける第2ターゲットステーションに設置されているSANS-2dが参考になる。上記分光器では、出力が48kWであるにも関わらず、出力が160kWの第1ターゲットステーションに設置されているSANS分光器LOQより使用中性子帯域におけるビーム強度が高い。2に関しては、ビーム輸送系として、楕円ミラーを用いる事を検討する。この場合、回転楕円体の第一焦点を線源に置き、検出器位置に第2焦点を置き、ガイド管自体を含めた大きな小角散乱装置を構成する(第80図参照)。場合によっては、ガイドにカーブを持たせて、線源を直射しない事を考える。このような光学機器を用いる事で、KENSにおけるSWANレベルの強度性能を確保する事を目標とする。

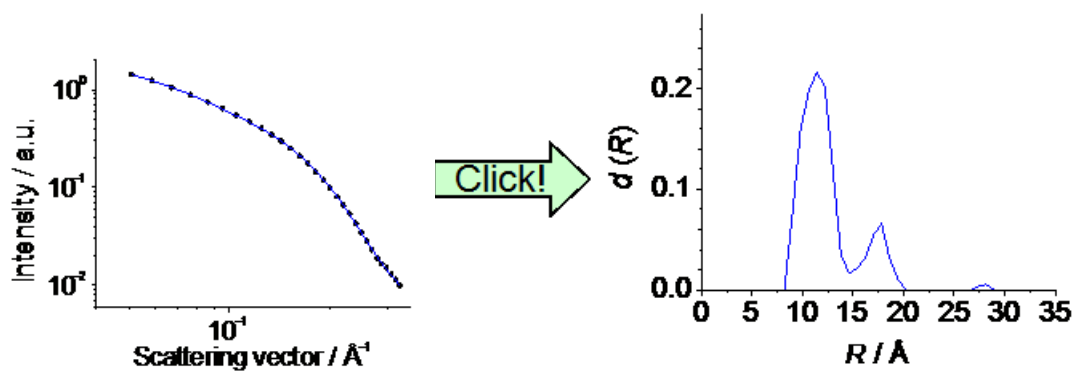


第80図 中性子小角散乱装置構成例

実際、KENSのSWANレベルのビーム強度が得られたら、第81図に示すようにソフトマター・バイオマターの試料の測定が可能であり、この分野の研究を推進できる。また、解析法の研究も進め、特に分析的利用を念頭に置き、試料・測定条件を与えたら「One click」で、散乱データから解析結果が得られるソフトウェア(第82図参照)の実用化を目指す。



第 8 1 図 測定結果例



第 8 2 図 解析結果例

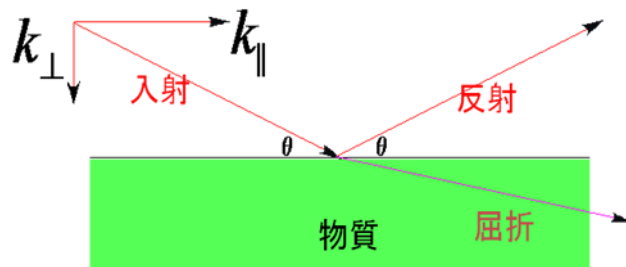
7. 1. 3 反射率 (日野)

中性子反射率法は中性子を用いて物質表面近傍の深さ方向の構造 (密度分布) を測定する手法であり、表面、界面の層の厚み、密度、組成、粗さをナノメートル(以下)の精度で知ることが可能である。

物質の表面・界面に関わる現象は極めて多様であり、対象も磁性薄膜等のハードマターから高分子等のソフトマターまで多岐に亘る。現象としても、吸着、濡れ、摩擦、潤滑、磁性、電極反応、自己組織化等と幅広い。厚みが数ナノメートル程度の狭い空間内で、異なる物質・相同土が接する場合、バルク中では見られない新奇な物性・構造の出現も多々見受けられる(例えば、ガラス転移温度低下、脱濡れ、表面選択濃縮等)。また表面だけでなく、なんらかの保護層に覆われた埋もれた界面も重要であり、中性子反射率法は、このような興味深い現代のナノサイエンスにおける解析技術として大変強力である。

中性子反射率法は、物質構造研究の代表的なプローブである X 線を用いた反射率法と同様に、中性子の「波」としての性質を利用する。中性子も光の反射・屈折現象を取り扱う光学の式を用いて記述することができ、波長が近い X 線領域の反射率法と多くの点で似通っている。

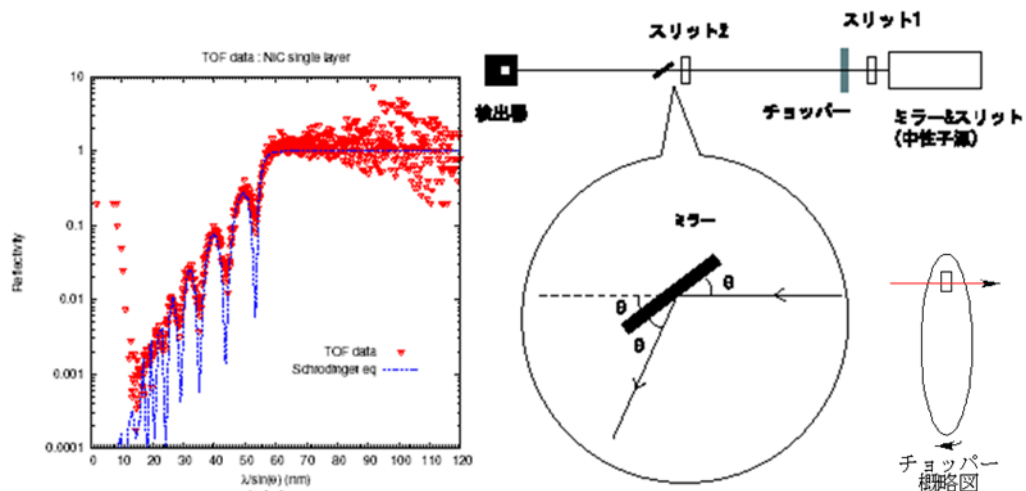
第 8 3 図のように反射法では平滑な試料表面に対し、ビームを浅い角度で入射し、反射率を測定する。そして入射角または波長を様々に変えて測定させ、弾性散乱の散乱ベクトル \mathbf{Q} の垂直成分 Q_z ($Q_z=2k_{\perp}$) に対する反射率強度のプロファイルを解析する。



第 8 3 図 中性子反射率法の概念図

しかし X 線は電子で散乱されるが、中性子は原子核で散乱されるため、得意とする観測対象が異なる

(この意味で相補性である)。そのため、X 線に対してはあまり敏感ではない軽元素の層構造などを研究対象とする場合に中性子は優位性を発揮しやすい。さらに、同位体効果を利用して、見たい部位だけコントラストを大きく変えられることで、化学的には同一な原子における拡散の様子なども観測可能である、そして同じ波長であれば、中性子吸収が非常に大きい元素を大量に含まない限り、透過能が X 線よりもはるかに大きくなる。これはより深く埋もれた界面を観測出来るというだけではなく、温度や圧力等の試料環境整備のための反応容器のなかの試料を検討することも難しくない。そして平滑性と中性子の透過性の良いシリコン基板や石英板を用いることで、固液界面や固体の接合界面等の X 線では大変測定しにくい対象も視野に入れることができる。更に、偏極中性子反射率測定により、磁気構造を精密に求めることも広く行われている。



第84図 KUR-CN3 冷中性子導管実験室における TOF を用いた中性子反射率測定
の概観と反射率測定の例

日本国内で一般的な物性試料の測定を行える装置としては、日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3 に設置されている 2 台の中性子反射率計 SUIREN と MINE が稼働中である。また同機構の大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) においても、BL16 に試料水平型中性子反射率計が稼働しており、BL17 では汎用の試料垂直型偏極中性子反射率計が建設中である。

原子炉のような定常中性子源における単色中性子を用いて入射角を変化させた反射率測定 (θ - 2θ 法) と異なり、J-PARC のようなパルス中性子源では、白色パルス中性子ビームが得られるため、入射角を固定したままで、つまり、試料を動かさずに固定したままで中性子反射率の測定ができる。これは自由界面などの気液界面をはじめとした、精密制御が必要な試料環境に適している。また時間でゲートをかけられるため、バックグラウンドはパルス中性子源の方が圧倒的に低い。中性子反射率法はパルス中性子源に向けた手法だと言える。そして J-PARC は世界最高クラスのパルス中性子強度を誇る。試料によっては分単位で反射率プロファイルの測定が可能となり、従来難しかった試料の時分割測定の適用範囲も飛躍的に広がる可能性があり、今後、多くの重要な成果が期待されている。

MINE は筆者が装置責任者であり、京大原子炉が設置、維持、管理をしている。MINE は、国内で最も古くから稼働している本格的な反射率計であり、世界に多くの反射率計がある今なお最先端の物性試料測定での成果を出し続けている[1]。また、第84図にあるように京大炉においても 10^{-3} 程度の反射率は 1MW の出力でも測定でき、中性子光学デバイスの評価や学生実験、反射率をさほど要しないが試料環境製作・調整に時間がかかる共同利用研究等を行っている。次期中性子源は、5MW の京大炉はもちろん、JRR-3 の MINE と比較しても、中性子反射率へのソースとしては強い中性子源が期待でき、我々が高い技術を要する中性子光学を駆使して、他には無いような輸送光学系の最適化を用いることで、MINE や SUIREN 等の JRR3 の原子炉と J-PARC の間をつなげる、非常にコストパフォーマンスの良い使える中性子反射率計を設置することも可能である。そして、現在、中性子強度が弱くても維持出来ているユーザーネットワークが飛躍的に拡大、様々な新しい展開が期待出来る。

[1] 例えば、「中性子反射率法による表面・薄膜界面の研究」、桜井健次、日野正裕、武田全康、J.Vac.Soc.Jpn, vol53, No.12(2010)1.でのリファレンス等。

7. 1. 4 粉末結晶（森）

7. 1. 4. 1 はじめに

近年、大強度陽子加速器施設（J-PARC）物質・生命科学実験施設（MLF）や米国 Spallation Neutron Source（SNS）において MW 級の大型パルス中性子源が建設されたことで、中性子科学の新しい時代が幕を開けている。パルス中性子源を利用した飛行時間型粉末中性子回折装置（以下、「TOF 粉末中性子回折装置」と称す）においても大強度パルス中性子ビームの恩恵を享受しており、これまで半日程度の測定時間を要する試料が僅か数分で測定可能となりつつある。しかしながら、装置の大型化が進む一方で、実験初心者や学生が扱える小型 TOF 粉末中性子回折装置が国内から消え始めていることも事実である。大型放射光施設（SPring-8 等）の粉末 X 線回折装置は多くのユーザーによって支えられているが、一定のユーザー数を維持できる大きな理由として、市販の X 線回折装置が研究室レベルで普及していることが挙げられる。中性子の場合、このような研究室レベルで保有可能な粉末中性子回折装置が存在しないため、ユーザーの育成において中規模パルス中性子施設（例えば、KEK/KENS 級、3-4 kW）や小型 TOF 粉末中性子回折装置の存在は極めて重要である。また、中性子ビームの大強度化に伴い装置性能も飛躍的に向上しているが、1 台あたり 10 億円前後の建設費用を投じているため、装置を改良することも容易ではない。そのため、装置の大型化は、将来の装置開発において不利な場合もあると考えられる。ここでは、高性能な大型 TOF 粉末中性子回折装置が存在する今日において、小型 TOF 粉末中性子回折装置の存在意義について検討し、KUR 新型加速器中性子源への設置を想定した「複合型 TOF 粉末中性子回折装置」の設計コンセプトについて述べる。

7. 1. 4. 2 アンケート調査の実施

まずは、粉末中性子回折装置を頻繁に利用するユーザーが、KUR に小型 TOF 粉末中性子回折装置が設置されることを望んでいるかどうかについて把握することが重要である。そこで、各研究分野（物性物理、材料科学、ソフトマター等）の中堅・若手研究者（30~40 代）十数名を対象として、2010 年 6 月末に簡単なアンケート調査を実施した（回答率は 56%）。アンケートの内容については、以下の通りである。

- (1) KUR に KEK/KENS 級の粉末中性子回折装置が設置された場合、利用するか？
- (2) 小型 TOF 粉末中性子回折装置に対するご意見

(1) の質問については、回答者全員から「利用する」回答を得ることができた。その主な理由については、以下にまとめる。

- ・ 現状の J-PARC/MLF の場合、申請・審査（年 2 回）から実際に測定できるまでのタイムラグが非常に大きい。材料開発を行うためには、タイムラグをできるだけ小さくして材料解析が可能であることが重要である。関西に産業利用を念頭に置いた随時測定可能なビームラインがあることが望ましい。
- ・ 自動車で移動可能な KUR に、小型粉末中性子回折装置ができれば是非利用したい。
- ・ J-PARC が万が一に停止したときに、国内で稼働しているパルス中性子源があるということは重要である。
- ・ 中性子は容易に予備実験ができない事情があるため、このような小型装置があれば利用すると思われる。また、小回りが利くので便利である。
- ・ 手軽に実験ができるということは、ユーザーの裾野を広げ、次世代を担う若手研究者の育成の面で重要な意味をもつ。
- ・ 1-2 週間程度の連続測定が可能になるとありがたい。特に、遅い化学反応を in situ 実験で追跡するためには、長時間ビームタイムを占有する必要がある。

- ・ 特殊環境測定が容易な粉末中性子回折装置を希望する。測定時間が多少長くても、特殊環境下を容易に準備するためのスペースがあると研究し易い。
- ・ 水素や電池の材料開発において in situ 測定がコアな評価技術になりつつあるので、柔軟に対応できる装置が望ましい。

また、他のコメントについても紹介する。

- ・ 装置分解能を犠牲にしてはいけない。J-PARC/MLF に比べて中性子ビーム強度が弱いことは仕方が無いので、装置分解能で確実に勝負できる装置であることが重要である。また、装置分解能が低いと企業のユーザー(特に、鉄鋼関係)は利用しないと思われる。
- ・ 小型施設(装置)を動かすためには、特化した目的が必要である。
- ・ よりユーザーフレンドリーな組織体系の構築を希望する。やはり、放射光施設と比較すると中性子施設は敷居が高いように感じる。

7. 1. 4. 3 小型 TOF 粉末中性子回折装置の方向性

頂いた多くの貴重なコメントを整理することで、ユーザーが希望する小型 TOF 粉末中性子回折装置の全体像が浮き彫りにされた。以下に、小型 TOF 粉末中性子回折装置の方向性についてまとめる。

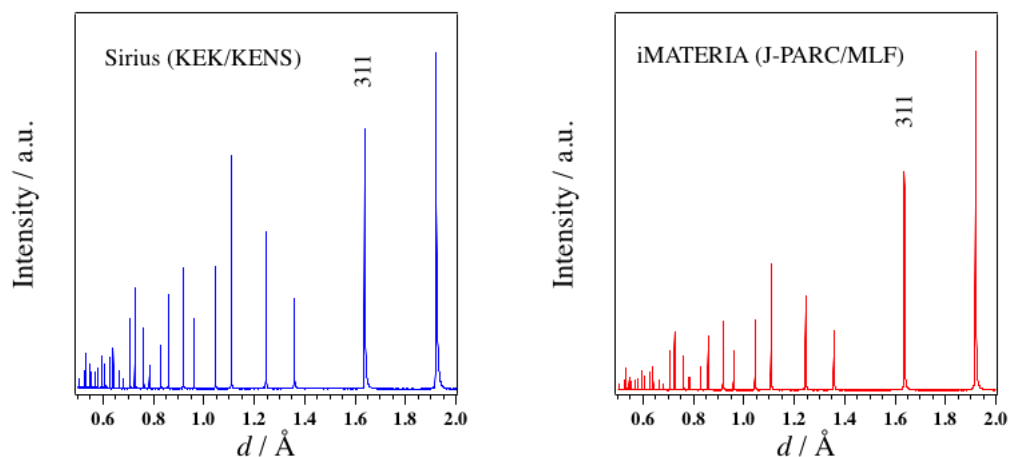
- a) 高分解能粉末中性子回折装置であること
- b) 特殊環境測定が容易に行える装置であること
- c) 複数の測定手法と複合できる装置であること
- d) 実験初心者や学生が扱い易い装置であること (教育的な要素を含む)
- e) 多少ビーム強度が弱くても、近距離に利用可能な装置があること

まず、上記 a) ~ c) の技術的な項目について検討した。TOF 粉末中性子回折装置の装置分解能 ($\Delta d/d$ 、 d は格子面間隔) は、

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta}{\tan \theta}\right)^2}$$

(L は中性子飛行距離、 t は中性子飛行時間、 2θ は散乱角。)

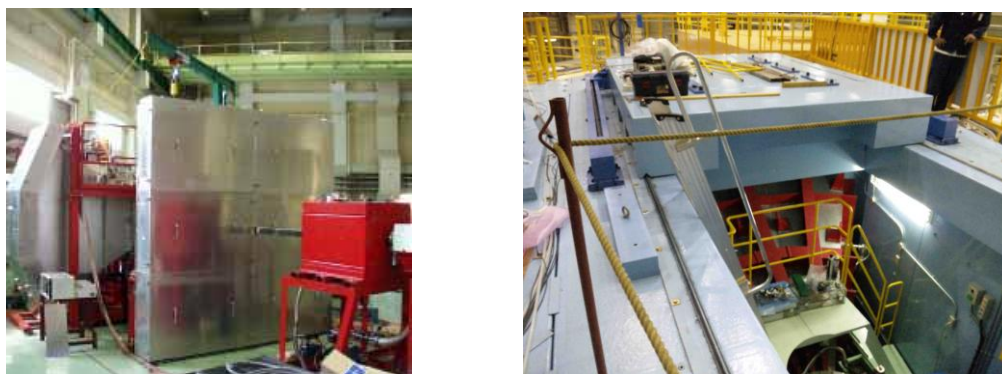
のように定義されるため、中性子ビーム強度に依存しない。第 85 図は、KEK/KENS で稼働していた Sirius と現在 J-PARC/MLF で稼働中の iMATERIA の装置分解能を比較したものである。比較している中性子回折パターンは共にシリコン (Si) 試料である。当然、Siriusの方が測定に時間を要しているが、得られる中性子回折パターンの質はほぼ同じである ($\Delta d/d \sim 0.1\%$)。言い換えると、測定時間が長いことを許容すれば (例えば、1 測定 24 時間程度)、小型 TOF 粉末中性子回折装置でも良質な測定データを得ることができる。このように、小型 TOF 粉末中性子回折装置は中性子ビーム強度の面において劣勢であるが、装置分解能に関しては大型 TOF 粉末中性子回折装置と同程度に上げることが可能である。



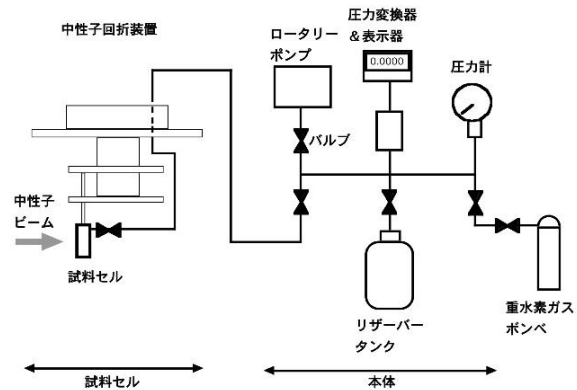
第85図 Sirius (KEK/KENS) と iMATERIA (J-PARC/MLF) の装置分解能の比較

次に、特殊環境実験や複数の測定手法の組合せ（例えば、電気伝導度測定やブラッグエッジ透過分光法等）に対して、「実験スペースの確保」が重要であることを指摘する。第86図は、KEK/KENSの装置（Sirius）とJ-PARC/MLFの装置の設置環境を比較している。注目すべき点として、J-PARC/MLFの装置は中性子ビームの大強度化によって、巨大な遮蔽体内に装置を設置しなければならないが、KEK/KENSの装置では巨大な遮蔽体が不要であることがわかる。第87図は、水素吸蔵合金の *in situ* 実験を Sirius で実施したときの様子である。このとき、装置本体周辺に自由な空間が存在していたことが水素チャージシステムの現場構築を容易にし、迅速な実験を可能にした。このように、「中性子ビーム強度が弱いからこそ巨大な遮蔽体が不要になる」ということが小型 TOF 粉末中性子回折装置にとって最大の利点であり、特殊環境発生装置や複数の測定手法の「複合」を可能にする。

以上のように、「高い装置分解能」と「優れた複合性」を有することが、ユーザーから求められている小型 TOF 粉末中性子回折装置に対する要望であり、これらを踏まえて「複合型 TOF 粉末中性子回折装置」の設計コンセプトについて検討した。



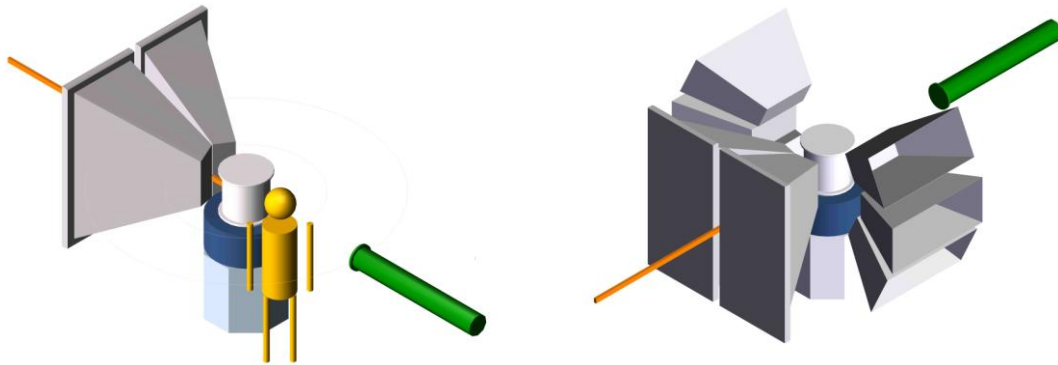
第86図 KEK/KENSの装置（左）とJ-PARC/MLFの装置（右）



第 8 7 図 水素吸蔵合金の in situ 実験例 (KEK/KENS)

7. 1. 4. 4 複合型 TOF 粉末中性子回折装置の提案

第 8 8 図は、KUR 新型加速器中性子源への設置を想定した複合型 TOF 粉末中性子回折装置のイメージ図である。高分解能中性子回折データを計測するため、背面バンク散乱槽 ($150^\circ \leq 2\theta \leq 175^\circ$) を常設している。背面バンク散乱槽内は、中性子による空気散乱を抑制するため、中性子散乱断面積が比較的小さい Ar ガスで満たされている。また、90 度バンクは稼働式とし、特殊環境実験等で必要な場合に取付ける。背面バンク散乱槽と真空試料槽以外は大気中にあるため、装置本体周辺に特殊環境発生装置や複数の測定機器を容易に設置できる。表 1 3 に複合型 TOF 粉末中性子回折装置の仕様 (案) を示す。また、学生教育や若手研究者の人材育成を考慮し、実験初心者が取り扱い易いコンパクトな構成を目指す。研究テーマについては現在模索中であるが、通常の研究テーマに加えて、数件の時限付研究テーマを設けて集中的に研究成果を上げることを考えている。コンパクトな装置とすることで、時限付研究テーマが終了した後、次の研究テーマに適した装置設定を迅速に行う。これも複合型 TOF 粉末中性子回折装置の大きな魅力となるだろう。



第 8 8 図 複合型 TOF 粉末中性子回折装置のイメージ図

表 1 3 複合型 TOF 粉末中性子回折装置の仕様 (案)

中性子波長	0.8–10 Å
線源–試料距離 (L_1)	20 m
試料–検出器距離 (L_2)	1.5 m
ビームサイズ (試料位置)	20 mm (横) × 40 mm (縦)
検出器	^3He 位置敏感検出器 (PSD) もしくはシンチレーション検出器 (位置分解能 : 5 mm)
装置分解能 (背面バンク)	0.2% 以下

7. 1. 5 断面積測定（堀）

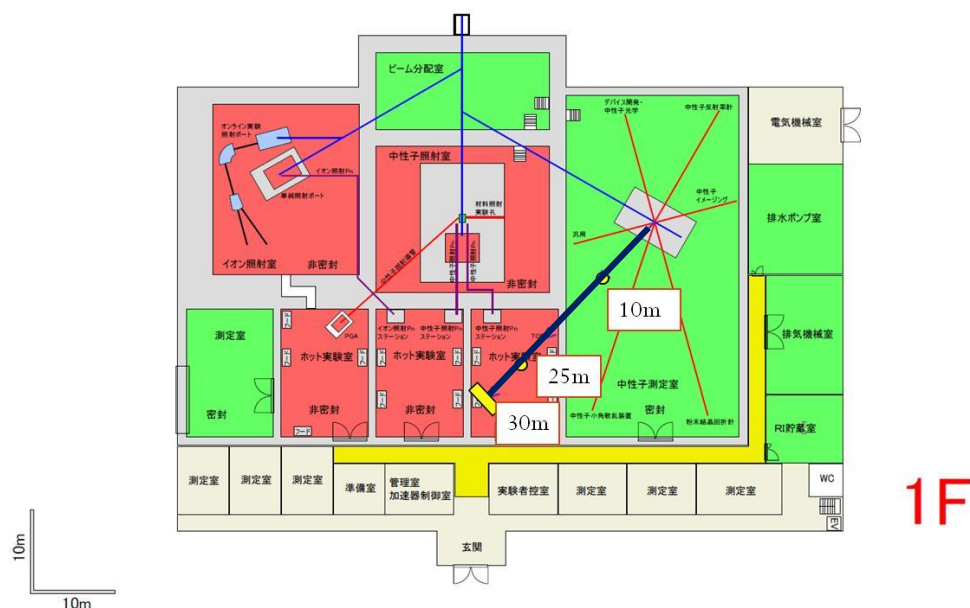
核分裂炉で生成される長寿命核廃棄物の処理・処分については、現在高レベル廃棄物は他の放射性核種と共にガラス固化・一時貯蔵・地中埋設することが我が国の国策となっている。しかし、長寿命核廃棄物を分離・抽出して、安定核種に核変換処理すれば、長期的な放射性リスクを低減し、地中埋設における環境負荷を大幅に軽減することができる。このような背景から長寿命廃棄物の分離変換技術（Partitioning and Transmutation）に関する研究は近年盛んに行われており、その手法として、加速器を用いた核変換（ADS）、高速炉を用いた核変換などが提案されている。核変換の対象となる核種はマイナーアクチニド（MA）と長寿命核分裂生成物（LLFP）の2種類に大別される。MAの核変換には、熱～keV領域の中性子を捕獲させて核分裂しやすい核種に変換する方法と、高速中性子領域でMAを直接核分裂させる方法が考えられる。MAの場合、核分裂断面積が数100keV付近から急激に大きくなるため、MAの核変換効率と燃焼を考慮する上で数100keV以上の核分裂断面積が特に重要な物理量である。中性子捕獲断面積は高次アクチニドの生成量とPu等の核分裂性核種への変換量を評価するために重要な物理量である。LLFPの核変換には熱～keV領域の中性子捕獲反応が利用される。そのため、核変換シナリオの成立性評価のためには、MAの核分裂反応については数100keV～MeV領域、MA、LLFPの中性子捕獲反応については熱～数100keV領域における核データの精度を高める必要がある。また、核燃料物質等に対する非弾性散乱反応は、炉内の中性子エネルギースペクトルに強く影響することがあり、核分裂反応、中性子捕獲反応に次いで重要な反応である。非弾性散乱はしきい値反応であるため、keV～MeV領域の核データの精度を高める必要がある。革新的原子力システム開発に求められる核データ精度の系統的調査結果が国際機関OECD/NEAのサブグループNEA/WPEC-26により取りまとめられ、2008年にOECD 2008 NEA No. 6410 “Uncertainty and Target Accuracy Assessment for Innovative System using Recent Covariance Data Evaluations”として報告された。本調査結果では、現状の核データ誤差を改善する必要性について、核反応の種類、核種、エネルギー領域ごとに定量的に示されている。主に改善が要求されている核種はMA、核分裂性核種及び原子炉構造材であり、keV領域以上の核分裂、中性子捕獲、非弾性散乱反応が挙げられている。

そこで、原子力システム開発に重要なkeV～MeV領域の高速中性子核データを取得するために、150MeV FFAG陽子加速器を用いたパルス中性子源を提案する。TOF（中性子飛行時間）法による高エネルギー分解能を得るために、短パルス陽子ビームが必須であり、150MeV FFAG陽子加速器のビーム時間構造はこれに最適である。また、エネルギーも核破砕領域であり中性子発生効率も高い。これにより、従来の電子線型加速器によるパルス中性子源に比べて、高いエネルギー領域で桁以上の強度が期待される。高精度の核データ取得のために、国内外では核データ測定用施設が急速に整備されている。国内では、J-PARCセンター物質・生命科学実験施設の第4ビームライン（BL04）において中性子核反応測定装置（Accurate Neutron-Nucleus Reactions measurement Instrument, ANNRI）が建設された[1]。本装置では世界最高水準の高フラックスを実現し、微量のサンプルを用いて熱～keV領域の中性子捕獲断面積に関する高精度測定が可能となっている。国外では、スイス・ジュネーブにある欧州共同原子核研究室（CERN）のn-TOF施設[2]、ベルギーGeelにある欧州共同研究所IRMMの電子線型加速器GELINA[3]が高中性子エネルギー分解能測定で世界をリードしている。一方、米国ロスアラモス国立研究所のLANSCE[4]での核破砕中性子源を用いた測定が高フラックス測定で世界をリードしている。

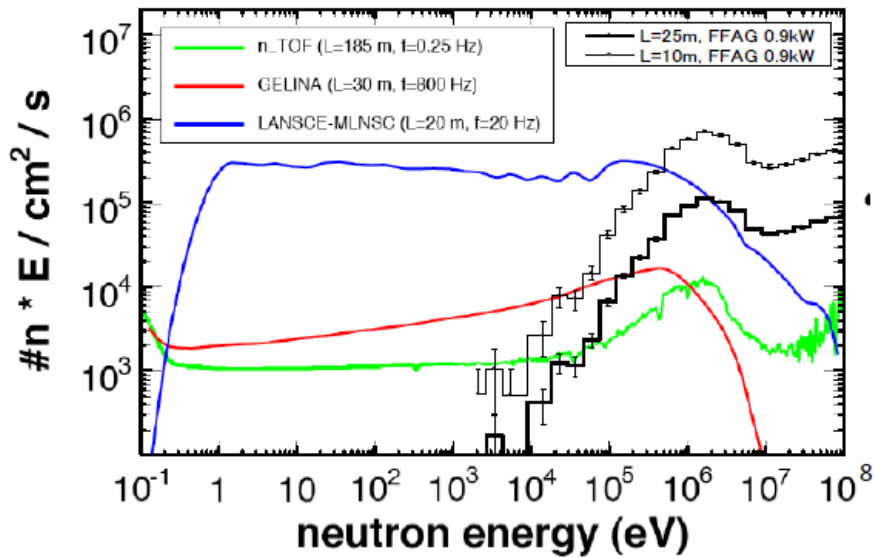
このような国内外の動向を踏まえて、我々は150MeV FFAG陽子加速器施設において、第89図に示すようなTOFビームラインの建設を提案する。TOFビームライン上には、中性子飛行距離10mと25mの地点に測定エリアを設ける。飛行距離10mでは密封放射性同位元素、飛行距離25mでは非密封放射性同位元素を使用可能とする。また、両測定地点において核燃料物質の使用を可能とする。FFAG陽子加速器のスペックとしては、加速陽子

エネルギー150MeV、平均ビーム電流 $6\mu\text{A}$ (ビーム出力 0.9kW)、パルス幅 30ns を想定した。核破碎ターゲットとしてはタングステンを選択し、陽子ビームがフルストップした場合の中性子源近傍における中性子束を PHITS-2.13 コード[5]を用いて計算した。計算には評価済み核データファイルとして JENDL High Energy File 2007[6]を用いた。本計算では、ターゲット周りに中性子減速材を配置せずにターゲットを直接見込むことにより、核破碎中性子を最大限利用することを考え、飛行距離 10m と 25m の位置における中性子束を概算した。各測定点に対して概算した中性子束を、国外の核データ測定施設の中性子束と共に第90図に示す。MeV領域ではn-TOF、GELINAのフラックスを上回っており、LANSCEに匹敵するフラックスが期待できる。

今回提案する新中性子源は三つの画期的な特徴を有する。一つ目は核破碎反応の高速中性子成分を最大限に生かしたパルス中性子源であること。二つ目は中性子源周りに中性子減速材の厚さを可変にすることにより、実験のニーズに合わせて中性子スペクトルの最適化を行えること。三つ目は核燃料物質及び非密封放射性同位元素の利用が可能であることである。これらの特徴を実現すれば、keV~MeV 領域の核データ測定の拠点としてユニークな中性子源となることが期待される。また、核燃料物質に対して高エネルギー領域の核データ測定を実施できる環境を整備すれば、J-PARC と相補的な TOF 施設として利用価値を高めることができると考える。



第89図 150MeV FFAG 陽子加速器を用いたパルス中性子源及び TOF ビームラインの配置案



第90図 中性子飛行距離10m及び25mにおける中性子束の予想値と他施設の中性子束の比較

ただし、測定地点における中性子束は、計算によって求めた中性子源近傍の中性子束を外挿することによって求めており、ビーム導管内での損失は考慮していない。

参考文献

- [1] M. Igashira, *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **A 600**, 332 (2009).
- [2] C. Guerrero, *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **A 608**, 424 (2009).
- [3] J. M. Salome, *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **179**, 13 (1981).
- [4] R. Reifarth, *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **B 241**, 176 (2005).
- [5] H. Iwase, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1142 (2002).
- [6] JENDL-HE-2007, Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency
http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl_J.html#jendl-sp

7. 1. 6 中性子イメージング

中性子ラジオグラフィは、中性子線に物体をかざして見るだけで画像が得られるという簡便性や、比較的中性子強度が弱くても十分な画質が得られることから、本格的な中性子源が開発されるとすぐに研究が開始され、世界的に見ても中小型炉における主たる利用分野になっている。比較的金属を良く透過し、かつ水素のような軽元素を含む物質で止まりやすいという中性子の性質から、X線と相補的な情報が得られる。そのわかりやすさと得られる情報が特徴的であることから、中性子ビームを利用する中性子源で中性子ラジオグラフィを行わないところはない、といっても良いほど汎用的なものとなっている。その結果、手法としての中性子ラジオグラフィは完成してしまっただけのような印象を与えていた時期もあった。しかし、その中性子ラジオグラフィ研究が、現在、研究炉の利用開始以来、最も激しい変革の時期を迎えている。

これまで全断面積のみを利用して単純に透過画像を得ていた中性子ラジオグラフィから、中性子散乱やX線イメージングからの影響を受けて、中性子の物質波としての位相情報を利用したフェイズコントラスト法、偏極中性子を利用した磁気イメージング等、新しい中性子撮像技法が大きく進歩している。その結果、従来の中性子ラジオグラフィの枠から逸脱し、新たに中性子イメージングと呼ぶべき分野が確立しつつある。さらに従来の常識を覆すような高効率検出デバイスの開発も進み、3次元CTから時間軸を入れた4次元CTにまで発展しつつあるし、応用研究も燃料電池を初めとして、コンクリート研究や植物研究等、大きく広がりつつある。

また、日本原子力研究開発機構が行っているトライアルユース制度は、産業界から実用可能性を持ったテーマを積極的に呼び込もうとするものであり、(回数を限り)無料で実際に測定を実施してもらおうというものである。これらの活動によって、今後確実に中性子の本格的産業利用が進展するものと期待されており、その応用はますます広がるものと考えられている。

中性子利用を行う場合、X線と比較してコストが高いことやアクセスが容易でないことから、「X線では撮像できない(もしくは困難である)体系」での利用研究が必要であり、その様な考え方の延長として、新たな手法として注目されているのが磁気イメージングである。これは中性子が磁気モーメントを持つことを利用した手法である。中性子回折・散乱の分野では、この性質を利用して試料の微視的磁気構造を決定することが盛んに行われている。これを中性子イメージングに利用すると、試料や試料周辺の磁気構造や磁場分布を測定することが可能となるため、これまでにない応用分野が広がるのではないかと期待されている。

また、J-PARCの稼働に伴い、パルス中性子源におけるイメージングの発展が進んでいる。既に飛行時間(TOF)法を利用したエネルギー依存イメージングやブラッグ散乱を利用した残留応力測定等、さらには中性子共鳴エネルギー領域での共鳴吸収を利用した中性子共鳴吸収分光法(N-RAS)等の研究が進められている。これらには北海道大学の電子線形加速器の寄与が非常に大きく、小型中性子源施設で世界をリードする研究を進める手本ともいべき活動を行っている。パルス中性子イメージングとして、これらの手法の応用が大きく広がるものと期待されており、本計画におけるパルス中性子利用においても重要な活動となるであろう。

散乱・回折が原子レベルの微視的構造を調べる手法であるのに対し、イメージングは巨視的レベルでの観察となるが、新たな中性子イメージングでは、中性子散乱やX線イメージングの影響を受けて、これまでの単なる全断面積の利用を超え、これらから得られるすべての情報をイメージ化しようという新しい展開が期待されている。

7. 2 中性子照射利用

7. 2. 1 加速器中性子照射利用の特長（瀬戸）

本計画では、加速器ベースの中性子源を導入する事を計画しているが、現時点でスペック等の詳細については未だ決定していない。そのため、ここでは照射用加速器中性子源としての数値を含めた具体的な特徴について議論する事はしないで、次期計画における照射用加速器中性子源としての考え方などを中心に考えてみたいと思う。

現在、国内における中性子源としては、KUR よりも熱中性子強度の強い研究用原子炉としては JAEA の所有する JRR-3 などが存在し、多目的研究用加速器中性子源としては JPARC が稼動しはじめている。また近い将来における核融合炉材料研究に特化した大強度高速中性子源としては、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) 計画がある。それに対して、本研究計画における中性子源は、“原子力・放射線の新たな利用法の開発を含む複合的な原子力科学分野の発展を目指し、個々の研究者の豊かな創造性に基づく先導的な研究の実施を旨として、萌芽的・基礎的な実験研究に重点を置いた共同利用・共同研究を実現する”ための装置と位置付けられている。KUR ではこれまで研究用原子炉を利用した共同研究・共同利用研究において培われた照射研究の大きな積み重ねが存在する。加速器ベースの新中性子源計画において、これらを活かして研究を発展・展開させていくことが大きな強みになると思われる。そのことによって、これまでの共同利用研究のアクティビティを維持・発展させることも可能になるものと考えられる。また、将来における小型加速器中性子源も含めた中性子利用研究の拡がりを見据えた先導的な研究も強く意識する必要があるように思われる。特に、多くの共同利用研を通じた得た研究の現状と展望の把握と共に、特定のミッションに捉われることなく自由な発想に基づく基礎研究を実施可能な大学機関に所属している KUR では、そのような先導的研究を実施可能であるものと考えられる。逆に言えば、そのような研究を実現出来るような規模の中性子源が本計画にとって必要であるとも言える。

以下に本計画で想定されている加速器ベースの中性子源の場合のメリット・デメリットについて幾つか挙げてみる。

1. 加速器本体およびターゲットを複数用いることで単純に照射強度を上げることは不可能ではないが、現在想定されている予算規模および将来的に予想されるランニングコストで実現可能な熱中性子強度は、現有の KUR よりも弱くなるものと考えられる。
2. 熱中性子強度は KUR よりも弱くなるものと考えられるが、KUR では得ることの出来ない高速中性子の利用が可能となる。しかしながら、そのような高速中性子が不要なユーザーにはバックグラウンドとなる。
3. 原子炉では法的な規制などから使用が制限されているような試料の照射が比較的容易に可能となるといった実験の自由度の高さ・機動性が挙げられる。
4. 加速器の運転が許す範囲で中性子パルスの照射間隔や強度の変更などといった、特殊な運転モードも実験者の要望により可能となる。
5. 中性子源という観点からは少しずれるが、加速器を利用することによる荷電粒子照射なども可能となることより、中性子利用だけにとどまらない新しい研究展開も期待できる。現在の計画は、中性子源がメインターゲットとなっているが、この荷電粒子照射が利用可能となることの利点は最大限活かすべきものと考えられる。
6. 今回の予算規模の加速器中性子源が十分役に立つものであることが実証されれば、今後の中性子利用研究の拡がりにも途を拓くものとなる。

以上の事から分かるように、加速器中性子源が単純に KUR の代替になるものとは考えにくく、そのような発想で考えている限り発展は望めないように思われる。しかしながら、自由度の高さや荷電粒子照射も可能となるなどといった加速器ベースの中性子源の特徴を理解して活用することで、これまでのアクティビティを活かしながら研究を発展させていく

ことは十分可能であると考えている。ただし、特徴を活かすということだけに捉われて、例えば、革新的な研究提案がないにもかかわらず、それを無理して推し進めることには注意が必要である。一方で、これまでの研究活動および実績を鑑みたときに、もうその役目を終えたと思われる研究や将来展開が期待出来ない研究を推し進めることも無意味であるものと考えられる。

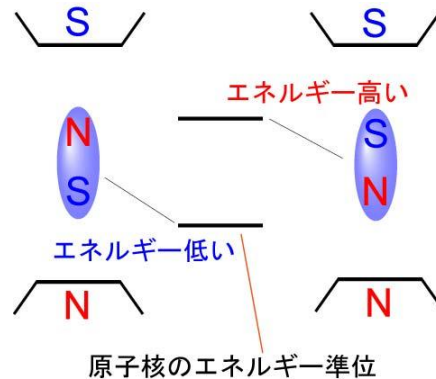
基本的な考え方としては、本複合原子力科学研究の趣旨にあるように個々の研究者の豊かな創造性に基づく先導的な研究を実施するために、これまでの着実な研究成果と本構想における加速器中性子源によって将来における研究展開が期待できる研究を実施して行く必要がある。

7. 2. 2 メスバウアー (瀬戸)

7. 2. 2. 1 メスバウアー分光法について

メスバウアー分光法は、鉄 (Fe) の磁性をはじめとした物性研究の他に、化学、生命科学、地球科学、基礎物理学等といった大変多岐に渡る分野の研究に利用されてきている^{1), 2)}。例えば、NASA の火星探査機が採取した試料に対し、その場でメスバウアー分光法による測定を行った。その結果、Jarosite ($(K, Na, X^+) Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$) を発見し、かつて火星には水が存在していたことを明らかにした³⁾。メスバウアー分光法は、原子核のエネルギー準位を調べることで電子状態を調べる方法であるが、磁石や電気伝導性などといった物質の性質は、物質を構成している原子の周りの電子がどのような状態 (例えば他の原子に一つ電子を与えたり、あるいはもらったりする等といった) になっているかによって決まってくる。よって、電子状態を調べる事は物質の性質を調べる上で大変重要である。一方で、原子核は原子のほぼ中心付近に位置しており、振動したりすることによって物質の熱的な状態に関与をしているものの、その原子核の状態 (エネルギー状態) が直接物質の性質に影響を及ぼす事は殆どない。しかしながら、原子核の状態はその周りの電子の状態によって大変小さいながらも影響を受ける。よって、原子核の状態を精度良く測定すれば、その原子の電子状態を測定することが可能となる。第91図に原子が磁性を持つ場合に、原子核のエネルギー状態異なった状態を取る様子を示す。

例えば酸化鉄 (Fe_2O_3) のように鉄 (Fe) と酸素 (O) から構成される物質の場合に、原子核を通して電子状態を測定することによって、平均としての電子状態ではなくて、個々の原子 (元素、正確に言えば同位体) の電子状態を測定することが可能となり、酸化鉄において鉄が磁性を担っていることを明らかにする事が出来る。また、例えばシリコン (Si) 半導体に含まれる ppm オーダー以下の鉄不純物の状態をほぼ全ての構成元素であるシリコン原子に妨げられることなく鉄原子がどのような価数で存在しシリコンとどのような相互作用をして半導体の特性に影響を及ぼすかということについても調べることが出来る。さらに、ヘモグロビン中における鉄の役割についても調べることが出来る。また、我々のグループでは近年国内で発見された鉄系高温超伝導体に対して、元素を特定したメスバウアー分光法による研究を実施してきた⁴⁾。メスバウアー効果は Fe が有名であるが、45 種類の元素で観測されている。特に、ランタノイドは Ce を除く全ての元素で測定可能である。また、



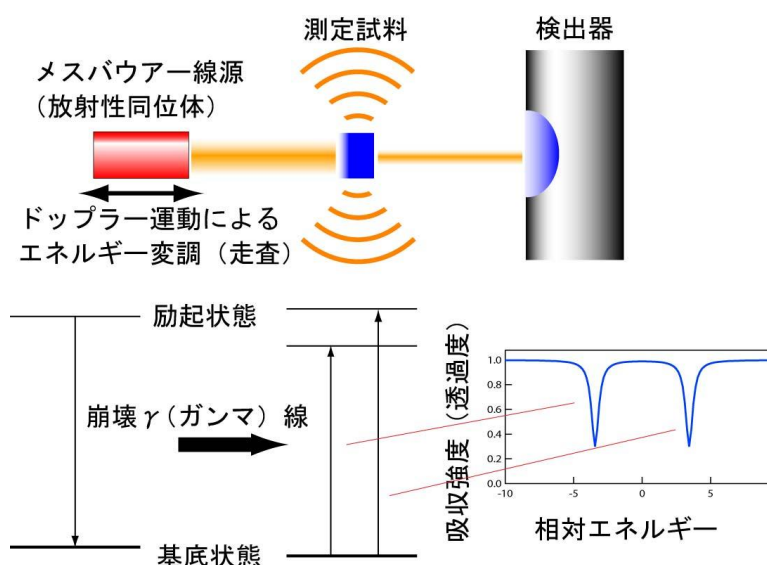
第91図 原子核の位置に電子の作る磁場が存在し、原子核が磁石としての性質を持っている場合には、原子核が左のような向きを持った方が安定となり (エネルギーが低い)、右のような向きの場合には不安定となる (エネルギーが高い)。このような不安定な状態を取るとは思えないかもしれないが、例えば物質が室温中に置かれた場合のように熱エネルギー等が存在する場合には、そのようなエネルギーを受けて原子核はこのような高い状態も取りうる。よって、原子核のエネルギー状態は高い状態と低い状態に分裂する。逆に、原子核のエネルギー状態がこのように分裂をしていることがメスバウアー分光測定によって分かれば、原子核の位置に磁場が存在していることが分かる。

アクチノイドも Th から Am まで測定可能である。これらの核種の詳細については文献[5]を御参照いただきたい。

7. 2. 2. 2 メスバウアー分光法を取り巻く状況について

このようにメスバウアー分光法は大変ユニークで強力な分光法となりうるが、測定には、測定対象となる原子核の励起のために、放射性同位体 (RI) 線源を用いる必要がある。測定対象となる試料に特に放射性同位体を用いる必要はなく、安定もしくは寿命の大変長い準安定な同位体を用いる。第92図にメスバウアースペクトルの測定方法について示す。通常は取り扱いの容易さから放射性同位体線源として寿命の長い元素 (主として Fe) の測定が多く行われてきた。しかしながら寿命の短い放射性同位体線源の場合でも、原子炉中性子照射によって線源を作製して直ぐに測定を行う事で、実現可能となるものも存在し、これまで当実験所においてもヨウ素 (I)、金 (Au)、テルル (Te) などの元素を特定した共同利用研究がなされて来た⁶⁾。

また、メスバウアー分光法は通常の場合には放射性同位体線源を用いて測定が行われるが、励起線源としては放射光の利用も近年進展している。我々の研究グループは科学技術振興機構 (JST) のCREST 代表となり、日本原子力研究機構、高輝度光科学研究センター、高エネルギー加速器研究機構、兵庫県立大および名古屋工業大学と研究グループを構築し、放射光によるメスバウアー分光法の開発研究も実施し、新しい分光法の開発に成功した⁷⁾。放射光の高輝度特性を用いることで、微細な試料や試料サイズが厳しく制限される超高压下での測定の場合には大変強力な手法となる。放射性同位体線源を用いたメスバウアー分光法においても、イメージング測定が可能なメスバウアー分光



第92図 メスバウアー効果測定には、通常の安定同位体 (もしくは準安定同位体) を含む測定試料の他に放射性同位体メスバウアー線源が必要とされる。一般的にこのメスバウアー線源ではエネルギー準位に分裂のないものが用いられる。そして、この線源からの γ (ガンマ) 線を測定試料に照射し、試料を透過してきた γ 線の強度を検出器で測定する。このとき、線源を動かすことでドップラー効果によってエネルギー変化 (走査) を行う。例えば上図の測定試料に前述のようなエネルギー状態に分裂がある場合、ドップラー効果によってエネルギー変化をさせられた線源からの γ 線は、測定試料において分裂したそれぞれのエネルギーに等しくなった場合に、測定試料において共鳴吸収される。エネルギーが等しくない場合には吸収されないため、検出器に γ 線が到達する。よって、右図のようにスペクトルにディップが現れる。このディップの存在によって、測定試料のエネルギー状態について知ることが可能となる。

器の開発も行われるなどメスバウアー分光法は新たな研究展開を迎えつつあり、本年度の物理学会でもシンポジウムが開催されている⁸⁾。本研究所においても、全国の大学法人と自然科学研究機構が連携して推進している大学連携研究設備ネットワークにおいて、本研究所に強磁場下短寿命メスバウアー分光装置の導入が認められ、既に設置が完了し、2.2Kにおいて最大 10T までの外部磁場下におけるメスバウアースペクトル測定が可能となった。このことより、磁性体や超伝導体の研究にさらなる大きな展開が期待出来る段階となっている。

国内における関連研究団体としては、メスバウアー分光学会、放射光を用いたメスバウアー分光法のコミュニティである核共鳴散乱研究会、また 2 年毎に世界各地で開催されるメスバウアーの応用に関する国際会議 (International Conference on the Applications of the Mossbauer Effect: ICAME) の国際委員会および国内委員会などが存在している。特に本年度 (2011 年 9 月 25 日-30 日) に東京において ICAME2011 が開催される予定となっており、関係者が開催に向けて活発に準備を行っている。

7. 2. 2. 3 新加速器中性子源によるメスバウアー分光研究

これまで述べたように、メスバウアー分光法を取り巻く状況は新たな展開を迎えつつあるが、新加速器中性子源により可能となる中性子照射と荷電粒子照射によって、表 1 4 に示すようにそれぞれ一方だけでは困難であった多く放射性同位体メスバウアー線源を作製することで、多元素メスバウアー分光法による物質・生命科学研究を大きく進展させていくことを計画している。共同利用研究の推進にあたっては研究分野を特に限定することはせずに、物質・材料、基礎物性、化学、生命科学、地球科学等の多岐に渡る分野において多元素選択測定の有効性を最大限活用することで研究を推進していく事をねらいとしている。また、このような広範囲の研究推進と同時に、プロジェクト研究として、大学連携研究設備ネットワークにおいて導入された強磁場下短寿命メスバウアー分光装置を活用することで、高温超伝導体や機能性高分子化合物などの先端的研究を進展させていくことも計画している。

表 1 4 中性子照射および荷電粒子照射によって生成可能な放射性同位体メスバウアー線源例。

中性子照射：	Au-197, I-127, I-129, Te-125, Sb-121, etc
荷電粒子照射：	Ni-61, Ru-99, Fe-57, Zn-67, Sm-149, etc

また、これまで長寿命線源が利用可能である事より多くの研究者によって活用されてきた鉄 (Fe-57) のメスバウアー分光測定などの場合でも、各研究室で放射性同位体線源を保持することはそれなりに負担となってきたことより、比較的容易に利用が可能であるのなら共同利用研究所における測定に対する需要も高くなってきている。当研究所がこれまでメスバウアー分光における共同利用研究において多くの実績を残してきた経緯を考えると、このような長寿命の線源の場合の測定も積極的に実施することで、メスバウアー分光測定をこれまで行ったことのない研究者はもとよりこれまで自ら測定を行ってきた研究者も含めて、よりアクセスしやすい体制を構築することも計画している。そして、このような短寿命のみならず長寿命線源も含めたメスバウアー分光研究に関する共同研究体制を確立することによって、国内だけでなく国際的にもメスバウアー分光研究の拠点となることも視野に入れた計画を考えている。

- 1) R. L. Mössbauer, Z. Phys. **151** (1958) 124.
- 2) メスバウアー効果全般に渡る教科書としては、例えば、N. N. Greenwood and T. C. Gibb: *Mössbauer Spectroscopy* (Chapman and Hall, London, 1971)。日本語のものとしては、佐野博敏、片田元己:メスバウアー分光学 (学会出版センター、1996)、藤田英一、那須三

- 郎、西田哲明、吉田豊:メスbauer分光入門 (アグネ技術センター、1999)。
- 3) G. Klingelhöfer, R. V. Morris, B. Bernhardt, C. Schröder, D. S. Rodionov, P. A. de Souza Jr., A. Yen, R. Gellert, E. N. Evlanov, B. Zubkov, J. Foh, U. Bonnes, E. Kankeleit, P. Gütlich, D. W. Ming, F. Renz, T. Wdowiak, S. W. Squyres, R. E. Arvidson, *Science* **306** (2004) 1740.
 - 4) Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, Y. Kobayashi, S. Kitao, S. Higashitaniguchi, Y. Yoda, M. Seto, and H. Hosono, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 18451; S. Kitao, Y. Kobayashi, S. Higashitaniguchi, M. Saito, Y. Kamihara, M. Hirano, T. Mitsui, H. Hosono, and M. Seto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**(2008) 10370; S. Higashitaniguchi, M. Seto, S. Kitao, Y. Kobayashi, M. Saito, M. Kurokuzu, T. Mitsui, Y. Yoda, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 024704; Y. Kamihara, T. Nomura, M. Hirano, J. E. Kim, K. Kato, M. Takata, Y. Kobayashi, S. Kitao, S. Higashitaniguchi, Y. Yoda, M. Seto, and H. Hosono, *New J. Phys.* **12** (2010) 033005.
 - 5) 瀬戸 誠、日本物理学会編集 *物理データ事典ブック* (朝倉書店、2006) VII. デバイスと機器 32.3 メスbauer効果.
 - 6) Kazuhiro Ikeda, Yasuhiro Kobayashi, Yuichi Negishi, Makoto Seto, Takeshi Iwasa, Katsuyuki Nobusada, Tatsuya Tsukuda, and Norimichi Kojima, *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 723; A. Kobayashi, S.Kitao, M. Seto, R.Ikeda, and H.Kitagawa, *Inorg. Chem.* **48** (2009) 804: 他多数。
 - 7) M. Seto, R. Masuda, S. Higashitaniguchi, S. Kitao, Y. Kobayashi, C. Inaba, T. Mitsui and Y. Yoda, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 217602.
 - 8) 「新たな展開を迎えたメスbauer・核共鳴散乱分光法ー最先端物性研究のプロープとしてー (シンポジウム)」、日本物理学会 2010 年秋季大会、堺、2010 年 9 月 24 日.

7. 2. 3 アクチニド・FP利用 (藤井)

新加速器中性子源を用いたアクチニド・FP利用の研究提案として、これまで KUR を用いた中性子照射によって行ってきた、アクチニド・FP トレーサの製造ができることは必須である。トレーサ製造の手法としては、非 RI 試料の照射による FP 核種の製造を含め、RI 及び核燃料物質自身を照射ターゲットとして用いることが可能であることが条件である。これに加え、これまで KUR の中性子照射設備では難しかった溶液試料を用いた中性子照射場の提供を提案する。

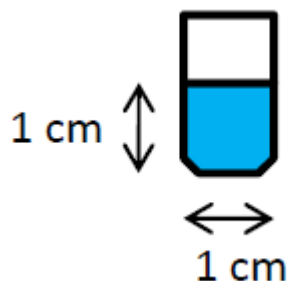
従来の照射設備においては液体試料の中性子照射が制限されている。溶液化学研究に供する放射性トレーサを製造する際には、固体試料を中性子照射してから目的とする液体に溶解して溶液調製を行い、その溶液試料を用いて実験系を構築することとなる。液体試料中の元素を定量分析する際には、試料を乾固してから中性子放射化分析を行うこととなる。トレーサ利用の場合、実験を開始するまでの化学操作に時間がかかるため、短半減期核種を扱う難しさが生じる。また、トレーサ利用および放射化分析において、揮発性の化学種は、加熱溶解や蒸発乾固の際に失われることがある。液体試料を直接中性子照射できる場を供することによりこれらの困難を克服し、中性子放射化を用いた溶液化学研究を展開するために液体試料に主眼をおいたアクチニド・FP利用研究を提案する。

KUR の照射設備においては液体試料の中性子照射が制限されているため、本テーマの新規性は高い。KUR の照射設備を用いる際には、試料をカプセルに封入して原子炉に輸送し中性子照射するため、空間的制限と、中性子照射場の条件 (圧力や温度) に制限があった。また、原子炉の反応度に影響するため Cd 被覆等遮蔽材料の使用にも注意が必要であった。加速器中性子源を用いた液体試料照射場は、それらの制限項目について自由度が高い。

装置の特徴としては、液体試料の中性子照射 (液体としては、水溶液、有機溶媒、熔融塩、環境水、等) が可能であることである。中性子源としては KUR と同程度の熱中性子束 (高速中性子成分による $(n,2n)$ 反応等の利用も考える) を希望するが、生成量が同程度となるような長時間の照射が可能となれば、この限りではない。周辺装置としては、照射範囲が 1 cm^2 程度の液体試料を考え、中性子場の影響の届かない範囲に装置 (イオンクロマトグラフィやゲルマニウム半導体検出器、等) を設置する。当所目的である放射性物質及び核燃料物質の中性子照射が可能である。研究案として下記①～④を提案する。

①液体試料放射化

溶液を照射した後、実験室に迅速に持ち出し化学実験に供する。溶液試料例を第93図に示す。必要に応じて、加圧・減圧装置、加熱・冷却装置、Cd 等の遮蔽材を設置可能とする。照射場は液体以外に固体の利用も可能である。

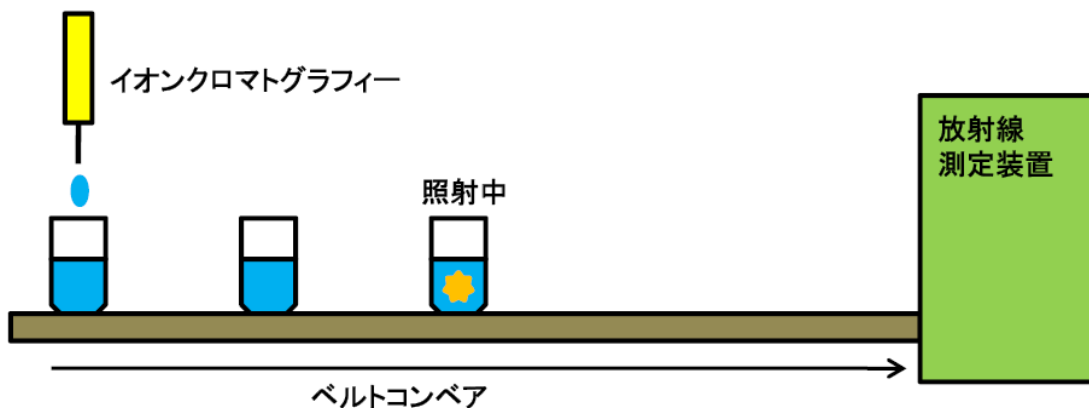


第93図 液体試料の例

1 cm^2 程度の照射面積を一例として示す。中性子ビームの広がりによっては、照射試料の大きさを変更する。加圧装置や温度制御装置内に設置した試料を照射することも可能としたい。

②液体試料放射化と分析

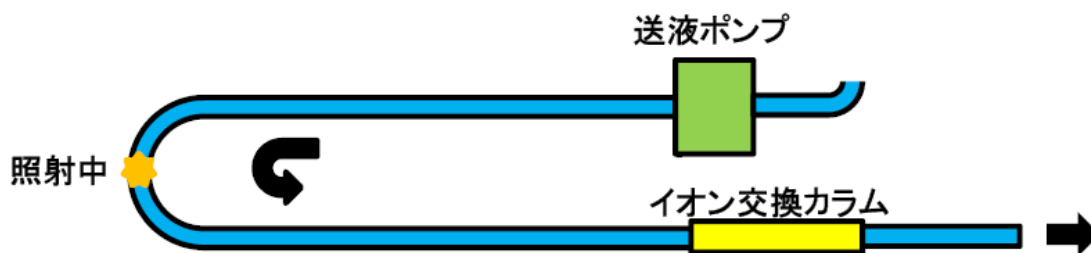
次々に溶液を照射し、放射化した試料の放射線測定を行う。ICP-AES、ICP-MS 等の定量分析装置の代わりとして本装置を用いることが可能である。また、液体の環境試料を直接分析、もしくは元素分離後分析することが可能である。



第9 4 図 液体試料放射化と分析の装置例
自動測定系を構築し、迅速な定性分析・定量分析を行う。

③液体試料放射化と分離

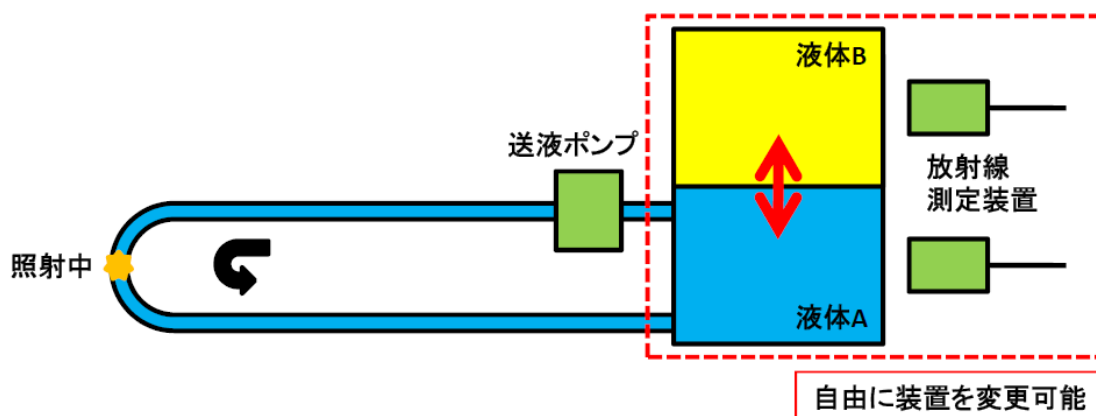
溶液を照射し不純物を除去して目的元素の溶存した溶液を回収する。ウラン等を照射した際、多量に生成する FP により高線量になる。不要な核種を除去することにより、効率よく目的核種を回収する。この照射法は、固体試料を照射するよりも利点がある。



第9 5 図 液体試料放射化と分離の装置例
溶液を照射した後、核種選択分離系を構築する。

④液体試料放射化と実験

照射した溶液試料を用いてその場で実験を行う。圧力、温度、等を変化させながら、核種の二相分配挙動等を研究。短半減期核種の化学研究に利点がある。



第9 6 図 液体試料放射化と実験の装置例
装置が照射設備と一体化する事により、単半減期核種の化学挙動等を調査することが可能となる。

7. 2. 4 RI 製造・利用（高宮）

加速器中性子源や加速器を直接用いた RI 製造および RI 利用研究は、国内外の既存の加速器施設において一般的に行われている実験研究であり、京都大学原子炉実験所においても原子炉や電子線型加速器を用いて様々な研究が行われている。これらの研究を複合原子力科学の一部として加速器や加速器中性子源を用いてより発展させるために、広く世界的に行われているような一般的な RI 製造や RI 利用に加えて実験所でしか実施できないような特徴ある研究を行いたいと考え、「加速器および中性子源を用いた放射化分析法による極微量分析研究」と「加速器および中性子源を用いた RI 製造研究」というテーマを提案する。

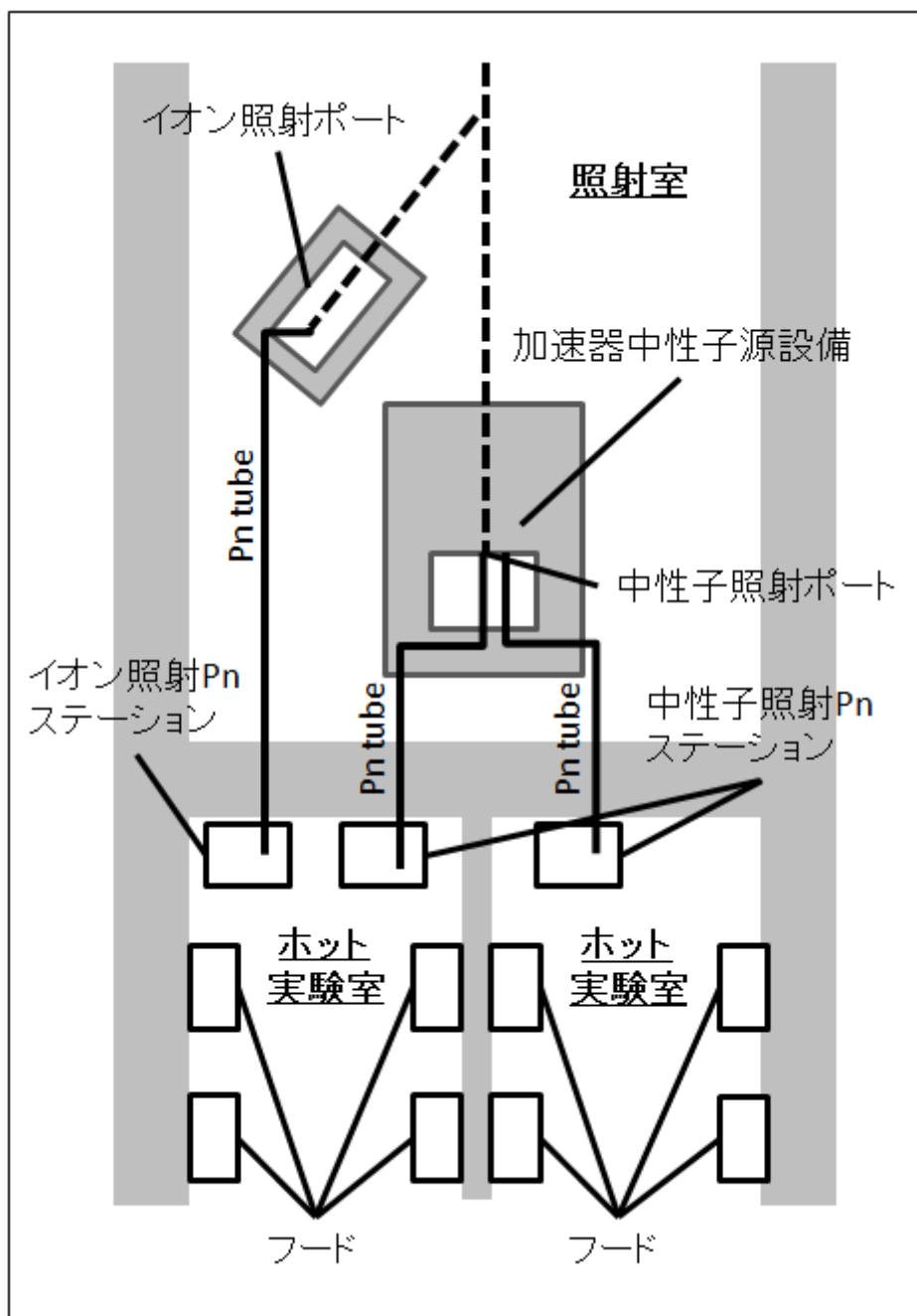
7. 2. 4. 1 加速器および中性子源を用いた放射化分析法による極微量分析研究

本研究テーマでは、まず従来原子炉を用いていた中性子放射化分析実験を、加速器中性子源を用いても可能であることを実証することから始める必要がある。原子炉における中性子照射においては、試料に照射される中性子の線量の時間的な変動や照射位置による差異がほとんど無視できるため理想的な照射が可能であるが、加速器からのイオンビームや加速器中性子源を用いた単純な照射では、加速されるイオンビームの時間的な変動や照射位置の変動によって均一な照射が困難であると考えられるため、試料への照射条件を検討する必要がある。しかし、均一な照射場や照射条件を作り出すことができれば、原子炉での中性子照射とは異なり、照射するイオンビームのエネルギーを変更したり、高エネルギー領域の中性子を照射したりすることができることを利用して、試料中に存在する元素に対して多様な核反応を起こさせることができるため、原子炉では分析が困難であった元素の分析が可能となる。このような特徴を生かして、京都大学原子炉実験所の装置を用いて分析可能な元素の種類を増やし、放射化分析法の適用可能領域の拡大を目指したいと考えている。これらが可能となれば、非破壊分析としての放射化分析法の適用分野の拡大が見込まれ、KUR のホットラボ施設と連携することで、京都大学原子炉実験所を日本における極微量元素分析の拠点とすることができると考えている。類似の照射装置としては、JAEA 研究炉の中性子照射設備や J-PARC、理研や大学などの研究機関が有する加速器施設における荷電粒子照射装置があるが、ホットラボとの連携による多種多様な分析が同じ施設内で可能な施設は他にないため、国内のみならず国際的にも特徴的な実験施設とすることができる。このような実験研究をより特徴的なものにするためには、照射可能な中性子のエネルギーを熱領域から数 MeV まで（可能な限り）モノクロマティックに照射を行うことで、これまで分析できなかった元素の高精度な分析を行う必要がある。このため照射する中性子エネルギーが精密に制御可能であることが望まれる。実験を行うための付帯的な設備としては、加速器からのイオンビームの照射位置および中性子源のできるだけ近い場所に照射ポートを設ける必要があり、照射ポートとホットラボ内の照射ステーションを照射試料輸送装置で結合し、ホットラボから照射試料の出し入れを行う必要がある。また、短寿命生成物の定量分析を行うために、照射した試料の放射能測定を行う同一管理区域内の低バックグラウンド測定室が必要である。具体的には、照射試料輸送装置（圧気輸送管照射設備、もしくは類似の装置）および照射試料開封のためのホットラボトリおよびフード、生成放射能を測定するための低バックグラウンド測定室および測定装置（Ge 検出器など）などが必要である。第 9 7 図に照射設備に関連した付帯設備の設置案を示す。

7. 2. 4. 1 加速器および中性子源を用いた RI 製造研究

近年、核医学の分野を中心に、国内での RI 製造（自給）の必要性が高まっている。しかし、RI の製造供給を安全かつ安定に実施するには、単に照射設備だけでなく、最適な照射条件、生成する RI の処理法などの技術的な検討が必要不可欠である。そのために、加速器および中性子源と多彩な照射装置を駆使し、多様な RI を製造するための技術の開発

および製造したR Iの供給（研究用）を行う必要があると考えた。そこで本研究テーマでは、加速器からのイオンビームや加速器中性子源を用いて、実験所の特徴を生かしたR I製造研究を行うことを提案する。単純なR I製造を行うだけであれば、他の研究用原子炉や加速器施設においても実施可能であるが、高エネルギー中性子による(n,xn)や(n,xn yp)反応などの中性子照射による多核子放出反応によってのみ生成可能なR Iは、中性子源を併設しない加速器施設や一般的な研究用原子炉では製造が困難であり、高いエネルギー（～数十 MeV）の中性子源を導入することができれば、他の施設では製造できない有用なR Iを製造することができる。加速器からのイオンビームを用いたR I製造においては、照射を行うイオンの種類およびエネルギーを可変とすることで、多くの種類のR Iを製造することが可能となる。また、本実験所ではアクチニド元素を照射ターゲットとして用いたR I製造を比較的容易に行うことができることも大きな特徴であり、他の施設ではできないようなR I製造も可能である。このような加速器からのイオンビームもしくは加速器中性子源からの中性子の照射によるR I製造においては、基本的には前述の極微量元素分析研究に必要な装置類を共用することで実現可能であるが、液体・気体試料の照射など特殊な照射環境を実現することで、製造できるR Iの種類や性質を広げることができるので、照射試料の輸送装置以外に、様々な条件での中性子照射が可能な照射ポートの設置を検討したいと考えている。



第97図 「加速器および中性子源を用いた放射化分析法による極微量分析研究」および「加速器および中性子源を用いたR I製造研究」において必要な付帯設備とその設置案

7. 2. 5 材料照射 (徐)

21 世紀においても原子力エネルギーが社会の基盤を支えるエネルギーとなることは明白であり、より安全で機能性が高く、資源の有効利用に道を拓き、核燃料サイクル上で柔軟性を有する原子力システムの開発が求められている。そこで、システムの安全を担保する材料の開発が非常に重要である。

材料照射効果の研究は、高エネルギー入射粒子と材料との固体内反応の解明、耐照射材料の開発、照射効果を用いた材料開発に分けることができる。固体内反応は、高エネルギー粒子が材料に入射して原子核との反応 (10^{-19} 秒) から原子炉材料の経年変化が問題となる 10^9 秒を超える幅広い時間スケールで起きる。耐照射材料開発のためには、最初の反応が起こる原子核レベルから 10m 近くの原子炉压力容器までの現象を扱わなければならない。材料を照射するとその状態は平衡状態から大きくずれ、熱平衡状態へと移行しようとする。しかしその前に準安定状態に落ち着くことが多い。その状態が他の方法では達し得ない状態ならば、新素材として用いることができる。このように幅広い事象を研究するためには、良く整備された照射場と最先端の照射後試験装置および理論解析が必要である。例えば 150MeV の陽子をステンレス等の材料に照射した場合、固体内原子は、陽子との相互作用の結果、500 個程度の原子が格子点より弾き出され、材料中を動き回り、欠陥集合体を生成して材料劣化を引き起こす。粒子のエネルギーが異なればその数も透過する距離も異なり、材料の温度が異なれば欠陥の挙動も大きく異なる。高エネルギー陽子の、入射付近の材料はほぼ陽子の加速エネルギーと同じエネルギーで損傷を受ける。陽子が内部に入れば、固体原子との相互作用でエネルギーを失い、低いエネルギーでの照射損傷が固体内原子と起きる。従って、GeV 近い高エネルギー陽子による照射損傷を解明するためには、低エネルギーから高エネルギーの照射実験が必要である。幅広いエネルギー領域の陽子による材料照射のデータを蓄積し、それを解析することにより照射損傷発達過程に関する知見を得る。

これまでの材料の照射損傷発達過程の研究には、試料はそのままの状態でも照射を受けることが多かったが、実際使われる材料は装置の部品の一つとして照射がされる。すなわち、応力をかけた状態で照射される。従って、材料の照射効果を評価するために、材料の使用環境の考慮も必要である。さらに、照射損傷発達過程を解明するために、照射が終わってから損傷組織の調べから損傷過程の解析より、照射しながら組織変化を動的に調べた方がより合理で、正確である。

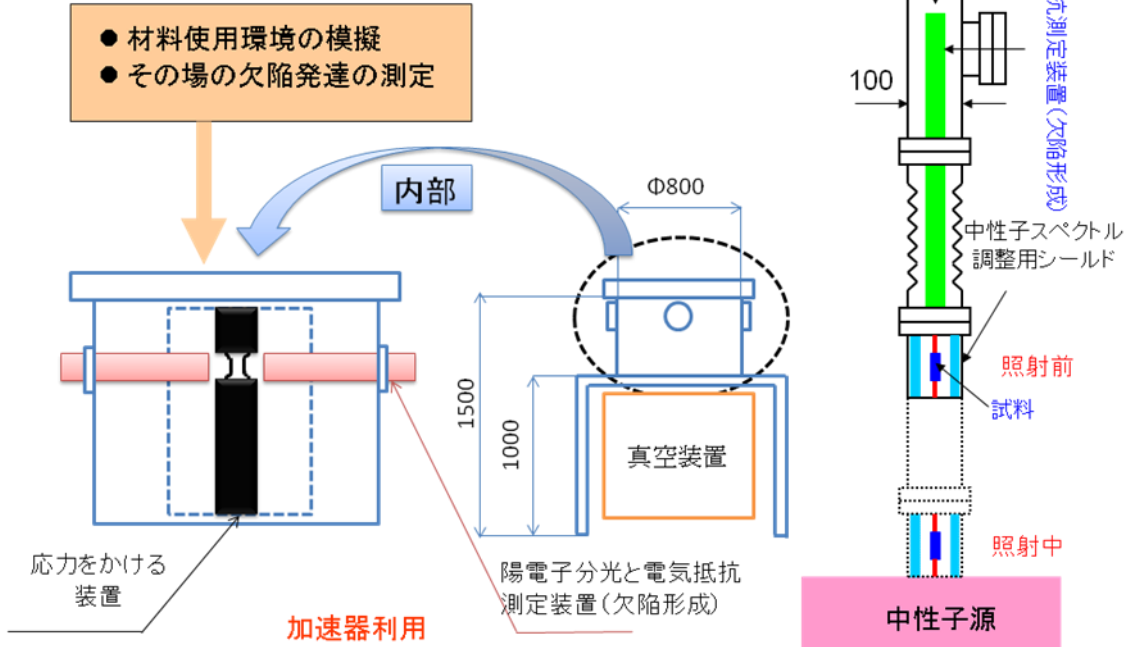
以上のことを考えて、われわれは新しい中性子源を用いて、広い温度範囲でかつ変動環境下での実験装置を設置する (第 9 8 図)。このような装置により、変動環境下で、動的な照射効果の研究を進めていく。たとえば、原子力材料の極低温から高温までの照射欠陥の回復過程を電気抵抗測定法により調べ、同時に各回復過程の活性化エネルギーを求める。これは材料中の点欠陥及びその集合体の挙動を知る基本的な手法であるが、最近はやがて行われておらず、そのため実用合金や最近開発された材料のデータは皆無である。ただし、電気抵抗測定法の感度は非常に良いが、欠陥の直接的同定はできないので、欠陥の同定のためには透過電子顕微鏡観察と陽電子消滅寿命測定を用いる。陽電子消滅寿命測定は材料中の原子空孔よりも小さな間隙の検出が可能であり、非常に有力な方法である。液体 He 温

度からの焼鈍過程の陽電子消滅寿命測定を行う予定である。このようなデータは照射下で使う材料設計に必須のものである。例えば照射損傷の計算機シミュレーションにも必要なものであるが、実際にはオーステナイト系ステンレス鋼の原子空孔の活性化エネルギーは Ni のそれを、フェライト系ステンレス鋼では Fe の値を使っているのが現状である。更に、入射粒子のエネルギー依存(カスケードサイズ依存)、H や He 等のガス原子の影響を解明し、今後の重照射実験結果の解明にも寄与するものである。

原子炉、核融合炉と加速器は起動、停止を繰り返すため、材料は熱応力により疲労する。同時に陽子や中性子により照射されるため、照射下で疲労が起きる。照射下で疲労試験を行うことは材料の寿命・強度を設計する上で重要である。しかし、現在まで高エネルギー粒子の照射下で疲労試験が行われた例は殆どない。試験片に力を加えながら照射を行った実験報告例は照射下クリープと照射下引張試験の二例程度である。イオン照射下クリープ試験は永川ら（物質・材料研究機構）により研究が行われている。ヘリウムイオン照射下での V 合金のクリープ試験で、ヘリウム注入によってクリープ寿命が長くなる傾向にあることなどが発表されている。また、Singh（リソ、デンマーク）らにより中性子照射下での引張試験が行われている。照射後試験をした試料と、同じ量の照射をしても照射中に引張試験を行った場合とでは大きな差があることが報告されている。照射下での機械特性試験が徐々にではあるが行われ始めている。われわれはその照射下疲労試験を行った試料と、負荷を掛けない状態で照射した試料の内部組織を陽電子消滅寿命測定及び電子顕微鏡観察によって比較することにより、照射下疲労の機構を解明する。

装置概要

多様環境下(高温, 低温, 応力)での実験



第98図 新しい中性子源を用いた材料照射装置

7. 2. 6 ISOL (谷口)

7. 2. 6 核分裂生成物の核分光学的研究及びその物性研究への応用

7. 2. 6. 1 はじめに

原子核という陽子と中性子(核子)からなる多体系は、その構成要素が1~250個程度であるにも関わらず、そこで発現する多様な性質は未だよく知られていない。この多体系の性質をより良く理解するためには、不安定原子核を生成し、その個々の性質を様々な手法を駆使し、詳細な測定をする必要がある。その一方、性質のよく調べられた不安定核は非常に優れたプローブとなり、物質中に導入されることにより、物質内部の局所的な場(磁場や電場等)と相互作用し、放射線の放出によりその場の情報を与えてくれる。本報告では、現在検討されている加速器中性子源及びそのドライバーとしての陽子加速器を利用した不安定原子核の研究及びその物性研究への応用について、その基本施設である核分裂反応を利用した不安定核生成用実験設備と共に提案がなされている。

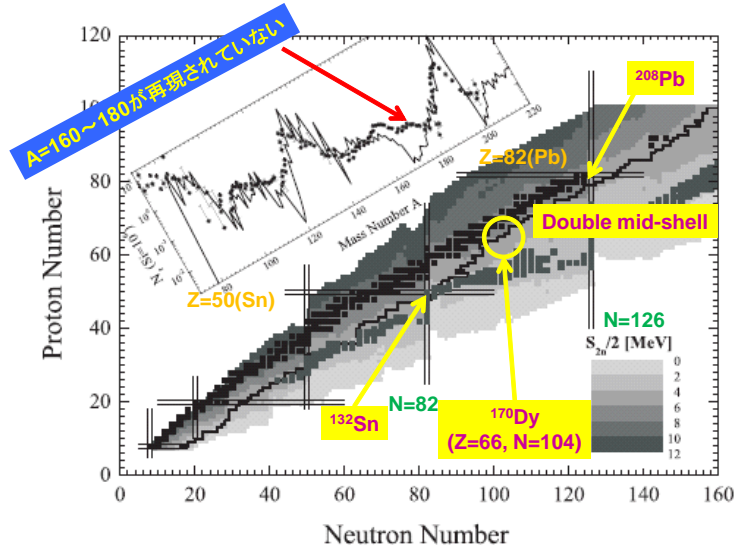
7. 2. 6. 2 不安定原子核を用いた研究

(1) 不安定原子核の核分光学的研究

安定な原子核の種類(核種)は300程度である一方、不安定原子核については、未だその存在領域が明確ではなく、理論的には6,000種類あるとも予想されており、そこには、未知の存在形態や運動様式が期待されている。このような核子多体系に対し、その全ての性質を理解できる究極の原子核モデルを構築するためには、原子核の存在領域を拡大しつつ、様々な不安定核を生成し、それぞれの核種に対するより精度の高い測定を通じて、既存の理論では説明できない現象を見出していくことが必要である。そしてまた、このようなデータの積み重ねの結果、原子核物理における大きな研究テーマの一つである「元素の起源」に対する解答も得られると考えられている。

エネルギーの比較的低い状態(10数 MeV 以下程度)にある原子核の研究は、対象原子核からの放射線を測定することにより、その原子核(≒原子)質量、半減期、アイソマーを含む励起準位構造や磁気モーメント等を調べ、原子核モデル等の理論的予測との比較・検討により、新たな知見を得ながら進められている。一例として、原子核質量の測定を挙げる。原子核物理において、原子核の質量は基本的な物理量の一つである。それは、その値が、原子核の安定性に関する指標であり、且つ、核子間相互作用の総和であるために、その相互作用に関する情報も得られるからである。これら各核種の質量測定の結果は、未知核種を含む原子核の存在領域全体に亘る原子核質量に関する理論に反映され、最終的には、原子核の存在領域や元素合成過程の解明に貢献することになる。原子炉附置のオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL)においても、これまでに高効率検出器の開発を進めながら質量数150近傍原子核の崩壊のQ値が測定され、幾つかの核種における原子核構造の質的变化を示唆すると共に、この結果を受けて、原子核質量の理論的予測値が修正された実績がある。このような例は、原子核実験の各領域・分野で見られることであり、そこで原子核が見せる(或いは今後見せるであろう)多様な性質(液的であったり、殻的であったり、カオス的であったり等)に対し、陽子と中性子の組み合わせ(「核子」として考えれば一種類の粒子)からなる単純な系で、その全ての性質を統一的な描像(モデル)により矛盾なく理解しようとしているところに面白さ(難しさ)がある。そして、それ故に、原子核の存在領域すら確定していない現状においてはこの目標はまさに究極であり、実験的研究の観点からは、個々の核種についての性質を、上述のように実験精度等を高めながら、着実に調べるのが大切となる。

A~170 近傍の原子核は、 ^{170}Dy ($Z=66, N=104$) に見られるように (図 1 参照)、陽子数・中性子数ともそれぞれの魔法数 ($Z=50$ と 82 、 $N=82$ と 126) の中間位置 (double mid-shell) にあり、Shell という一つの基準から最も離れた核種であるため、Shell 近傍核との違いを見る上で興味深い領域である。また、元素合成過程の研究の観点からも、第 9 9 図に示すように、観測された核種の成分とその理論的予測との比較において、質量数 $A=160\sim 180$ の領域が再現されておらず、この領域にある原子核の詳細な核データが必要であると考えられる。したがって、現在検討されている加速器と加速器中性子源を利用した研究の一つとして、この領域に対する核分光学的研究を提案する。

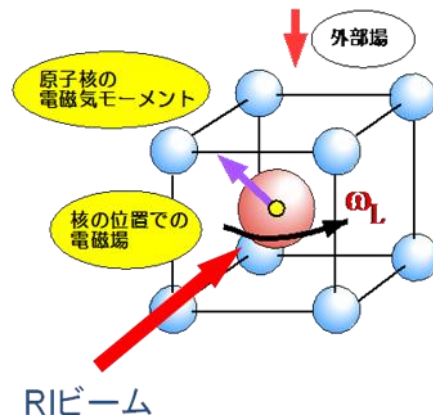


第 9 9 図 核図表における A~170 近傍の double mid-shell 核の領域。Inset 中のグラフは、太陽の r-process 核種の組成について、観測値と理論計算値とを比較したものである。(Sun, Bao-Hua et al., Chinese Physics Letters, Volume 25, Issue 7, pp. 2429-2431 (2008). Physical Review C78, 025806(2008))

(2) 不安定原子核をプローブに利用した物性研究

半導体に代表されるように、不純物の混入により物質に新しい機能が発現することは広く認知されている。このような新機能物質を効率的に見出すためには、基礎的な物性を調べ、その発現メカニズムを解明することが肝要である。このような研究の手段に、不安定核をプローブとして物質に混入し、その内部場とプローブ核との相互作用を利用する方法がある。この方法では、物質中に希薄に拡散している一つ一つの放射性プローブ核からの放射線を測定するため、プローブが存在する場所における局所的な電磁氣的構造を調べることが可能であり、物性研究における有力な方法の一つとなっている。しかしながら、従来のこのような放射性プローブ核を用いた物性研究においては、対象試料 (物質系) へのプローブの導入は化学的過程によるものが多く、生成される物質系の多様性に限りがある。一方、イオン注入法という力学的手法を用いた場合、化学過程では通常生成できない特異な物質系を創ることが可能であり、その多様性を飛躍的に増やせる。この研究を進展させる上で、不安定核を対象物質に注入する装置が必要であり、特に、同位体分離装置から得られる不安定核を物質中に注入するシステムは、プローブ核種の純度や注入位置・深さの制御等において優れており、その重要性が認知されつつある。

本計画では、特に、アクチノイド元素の核分裂反応において希土類元素核種が高収率である特長を生かし、希土類元素を含む物質系内の超微細場の研究を推進する。対象とする系

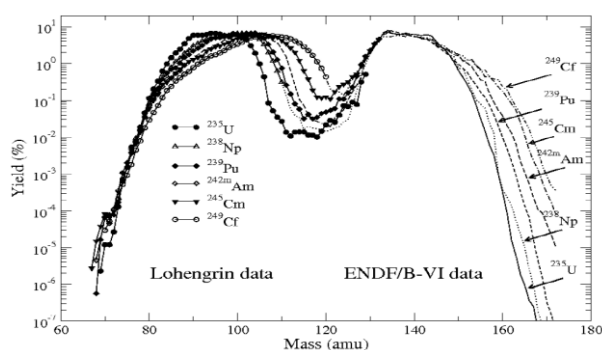


第 1 0 0 図 超微細場と注入された RI (概念図)

は遷移金属酸化物と希土類元素の系であり、この系は High-Tc 超電導や超巨大磁気抵抗などの性質を示し、最近においても、 $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ の系において新しい相転移が見つかる(A.M.L. Lopes *et al.* PRL 100, 155702(2008))など、大変興味深い系である。このような系の超微細場を摂動角相関法により測定しその物性を調べると共に、第一原理計算の直接的検証を行いその精密化にも貢献し、新機能物質創製へ寄与する。さらにまた、希土類元素系での研究は、より研究が難しいとされているアクチノイド元素系の研究の基礎となると期待される。さらに、この種の注入装置は、多様な放射性核種を利用できるのが望ましく、核分裂反応を用いた場合、多種多様な不安定核が生成されるので、表面電離型イオン源、低圧アーク放電型(FEBIAD 型)イオン源やレーザーイオン源を併用することにより、非常に広範な元素が利用できる注入装置へと発展させることができ、この種の研究における先導的な装置となることが期待される。

7. 2. 6. 3 オンライン同位体分離装置

2. で挙げた研究を遂行する上で、必要となる装置がオンライン同位体分離装置 (ISOL ; Isotope Separator On Line) である。ISOL は、核反応により生成した不安定原子核を同位体毎に分離する装置であり、その半減期が 1 秒以下の核種に対しても分離・抽出する能力があり、非常に広範囲わたる不安定核種に対する研究・利用が可能となる。検討されている ISOL の特長は、加速器中性子源の(熱)中性子及び中性子源用として設置される陽子加速器からの陽子の双方を、不安定原子核の生成に利用している点にある。現時点で検討されている陽子加速器は、陽子エネルギーは 30 MeV 程度であるが、その電流は数 mA という仕様である。不安定原子核生成の観点では、数 mA の 30 MeV の陽子は強力であり、例えば、日本原子力研究機構のタンデム加速器に附置されている ISOL では、最大 40 MeV、3 μA の陽子が利用されていることを考えると、その強度は 1000 倍も高く、この大電流陽子と ^{238}U の陽子誘起核分裂反応を用いることにより、 $A \leq 165$ 領域の核種については高強度の不安定核ビームの生成が期待できる。そしてさらに、中性子源の中性子により、KUR の原子炉室では利用できない(核燃料物質以外の)アクチノイド元素 (^{249}Cf , ^{245}Cm など) の核分裂反応を利用し、 ^{238}U の陽子誘起核分裂では到達困難なより重い核種 ($A \sim 170$ 近傍核) を生成する(第 101 図を参照)。これにより、高いビーム強度の不安定核が要求される場合は強力な陽子ビームによる ^{238}U の陽子誘起核分裂反応を利用し、また、より重い核種を利用する場合には、熱中性子によるアクチノイド元素の核分裂反応を利用するという、ユニークな装置を構成することができる。第 102 図に検討された ISOL の概略図を示す。上述のように、ターゲットポジションが 2 か所(イオン源室内と中性子源内)設けられており、イオン源室内においては、陽子ビームによる ^{238}U の核分裂、中性子源内ではアクチノイド元素の核分裂反応を利用し、不安定原子核が生成される。イオン化の後、不安定原子核はビーム化され、途中、質量分析用電磁石により、特定の質量数を持った核種のみが分離され、実験ポートへ輸送される。低バックグラウンドの実験ポートでは、不安定原子核の試料への注入や核分光実験を行うほか、イオントラップ等の精密なイオンハンドリング技術の開発等を行うポートが設けられている。



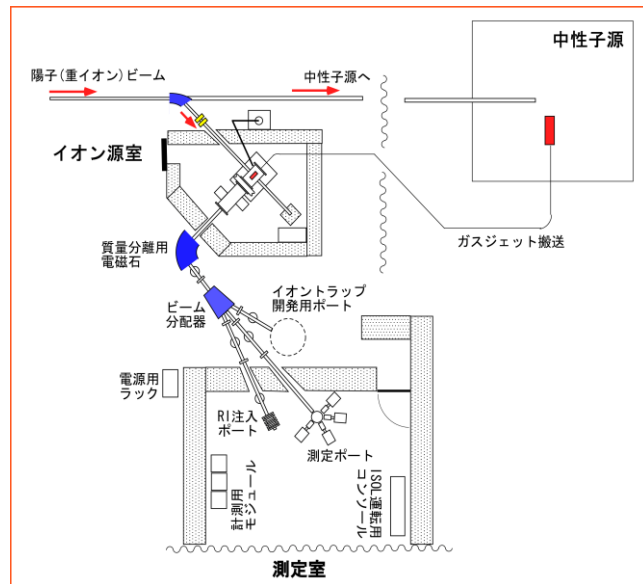
第 101 図 アクチノイド元素の熱中性子の核分裂収率。 ^{249}Cf や ^{245}Cm の $A \sim 170$ 近傍の重い核種の核分裂収率が ^{235}U のそれよりはるかに大きい。(A. Scherillo, PhD thesis 2005, University of Koeln.)

7. 2. 6. 4 まとめ

不安定原子核を利用した研究として、アクチノイド元素の核分裂反応による不安定核生成・分離装置とそれを用いた原子核物理に関するテーマ及び不安定核をプローブに用いた物性へ応用研究について検討した。

不安定原子核に関する研究テーマとしては、不安定核生成装置と中性子源を組み合わせる不安定核の中性子捕獲反応の研究やさらに遠い原子核の生成に向けた不安定核の加速（2次ビーム加速）なども検討され、これらの研究については、中性子源等のさらなる向上を期待しながら、将来的な実現に向けてその基礎研究を進めたいと考えている。

今回提案した不安定核生成装置の性能に関しては、プライマリ粒子として陽子ビームと中性子の双方を利用する点ではユニークであるが、生成核種の範囲・強度において、各国や各地域を代表する装置に勝るものではない。しかしながら、上述のように、存在する全核種について丁寧に精密核分光実験を行わなければならない状況においては、中小規模であっても、マシンタイムを十分に確保できる施設は重要であり、また、これまで行われてきたような測定機器等の開発の場としても、利用価値のある施設として機能すると思われるが、この点については、不安定原子核の生成・分離装置やその利用に関する国内組織「停止・低速不安定原子核ビームを用いた核分光研究同好会」等において検討が重ねられることになる。



第102図 提案するオンライン同位体装置と実験ポート。

7. 2. 7 BNCT 及び関連照射 (田中)

BNCT の研究は医学・薬学・化学・生物・物理工学と広範囲に渡って行われており、医学 (臨床) 応用に向けた研究で社会的貢献度は大きい。これまで KUR 重水設備で実施してきた、新規薬剤開発、照射手法の開発、放射線生物学的研究は臨床試験を推進する上で重要な役割を果たしてきた。従来、開頭照射、悪性黒色腫に BNCT は実施されてきたが、各研究分野の成果を基に、頭頸部癌、肺癌、肝臓癌などの症例の適応拡大に役立ってきた。BNCT の発展のためには、これらの研究開発を新規中性子源においても実施する必要がある。

世界中で BNCT 用加速器中性子源の開発が行われており、種々の方法が検討されているが、いまだに実現には到っていない。本装置は世界で類を見ない中性子発生装置であり、BNCT 研究において COE となりうる。

装置概要と必要な主要パラメータを以下に示す。BNCT 治療に有効な熱外中性子強度 $>10^9$ ($/\text{cm}^2/\text{s}$)、治療ビームに混在する高速中性子線量 $<4\sim 10\times 10^{-13}$ (Gy/cm^2)、混在ガンマ線線量 $<2\times 10^{-13}$ (Gy/cm^2)が必要である。また前臨床試験として動物・細胞照射用の熱中性子を発生可能なスペクトルを変更させるシステムでかつ適応拡大のための治療も行うことができることが望ましい。6. 5 節に照射システムの概要を示す。

また、BNCT の臨床試験においては血液中、マウス照射などの前臨床試験においては各臓器内でのホウ素濃度を測定する必要があるが、KUR の E-3 導管のような即発ガンマ線解析装置が必要である。熱中性子強度は 10^6 ($/\text{cm}^2/\text{s}$) 以上であることが望ましい。

7. 2. 8 生物照射 (齊藤)

始めに「低 LET 放射線から高 LET 放射線へ」:

放射線の生物影響研究はこれまで主に γ 線、X線などの低 LET*電磁波放射線による影響に基づいて研究が進展してきた。しかし、現在、放射線医学治療、放射線防護、環境への放射線影響の観点より、中性子線、粒子線などの高 LET 放射線による生物影響の評価、影響機構研究の必要性が高まってきている。そこで、新加速器を利用した当実験所における放射線生物照射研究、放射線生物影響研究の将来像について、「放射線医学治療」、「放射線防護」、「環境への放射線影響」に対する研究を柱として検討を行った。以下に各研究カテゴリーの重要性と具体的な研究提案の概要を示す。

* LET (Linear Energy Transfer、線エネルギー付与): 電離放射線の飛跡の単位長あたりに付与されるエネルギー。単位は keV/ μ m。LET によって放射線の生物影響、生物応答メカニズムは異なる。

研究カテゴリーの重要性:

放射線医学治療

放射線ガン治療において、 γ 線などの低 LET 放射線を用いた治療に加えて、BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) や粒子線治療など高 LET 放射線を利用した治療の適用例が増加してきている。原子炉実験所においても今後、BNCT による治療件数が益々多くなることが予想され、その治療成績の向上、治療効果の評価、そして治療の基盤となる基礎的機構の解明が望まれる。

放射線防護

多くの原子力発電所や加速器施設が建造され、また人類が宇宙空間へ進出している現代における放射線防護を考えたとき、低 LET 放射線からの防護という視点に加えて、 α 線、中性子線、そして宇宙空間で被曝されることが予想されるいわゆる宇宙放射線などの高 LET 放射線に対する安全管理、防護の必要性は広く認識されている。このような高 LET 放射線に対する合理的な安全管理、防護体系の構築には、高 LET 放射線のヒト (哺乳類) への影響研究は不可欠であり、その基盤となる基礎研究は重要と考えられる。

環境への放射線影響

ICRP などの多くの国際機関において、環境への放射線影響研究の必要性が提言されている。このとき、低 LET 放射線による影響だけでなく、原子力発電所、放射性廃棄物などから放出される α 線、中性子線などの高 LET 放射線による環境生物への影響研究が必要であると考えられる。環境生物への高 LET 放射線による影響の基礎的研究は、環境への放射線影響を考える際に必須の情報を提供する。

研究提案:

① 〈研究内容〉 ヒト培養細胞およびその DNA 修復機構欠損株へ新加速器より得られる高 LET 放射線を照射し、種々のエンドポイント (生物学的評価系において対象となる事象) における影響を解析し、低 LET 放射線である γ 線、X線、陽子線照射による影響と比較する。

〈研究意義〉 ヒト培養細胞における高 LET 放射線に対する感受性に関与する生体内機構を明らかとし、哺乳類における外的ストレス防護機構、高 LET 放射線影響の基礎的知見を得ると共に、放射線治療における医学的に重要な情報を提供することができ、さらに放射線防護の発展に貢献できる。

② 〈研究内容〉 BNCT と陽子線治療の併用療法における臨床医学的研究を実施する。

〈研究意義〉 BNCT に陽子線治療を併用することにより、BNCT の最大の弱点である体深部に及ぶ線量不足を補うことが可能となり、腫瘍全体の線量分布の改善が得られる。このことにより、BNCT の適応腫瘍の拡大、治療成績の向上が期待される。体深部にある腫瘍への

線量追加のための治療を考えたとき、陽子線治療は X 線治療より線量分布の観点から優れている。

③〈研究内容〉高齢化社会において、放射線治療や化学療法などの癌治療後、特に中枢神経系への照射後等の認知機能など神経学的機能の低下は患者の QOL（生活の質）維持にとっては重大な問題である。このような神経学的機能に基づく RBE*決定のための動物実験においては、中枢神経系の照射するべき部位には十分に照射し、してはいけない部位（感覚野、運動野など）にはできる限り照射を抑えることが必須となる。この選択的照射を実現するためには、対照とするべき X 線・ γ 線では組織透過性が高すぎて不可能であり、RBE がほぼ同じとされるブラッグピークを有した陽子線ビームが最適と考えられる。このデータが得られた後にはじめて、BNCT などの中性子ビーム照射時との比較を正確に評価できることとなる。

〈研究意義〉神経学的機能をエンドポイントとする BNCT などの中性子ビーム照射の評価が可能となる。このような評価自体新規性は高いが、今後の高齢化社会における癌患者の QOL 維持のためにも、非常に有意義な研究課題であると考ええる。

* RBE (Relative Biological Effectiveness、生物学的効果比)：種々の線質の放射線による生物学的効果の相対的効率を表す量。標準放射線としては X 線または γ 線をとる。RBE を求めることは、放射線の生物影響、治療効果を評価するに際し極めて重要である。

④〈研究内容〉モデル生物に様々な有用物質を産生していることが予想される生物を食餌として直接摂取させ、低 LET から高 LET に至る様々な線種の放射線を照射後、コントロール群と比較し（特に被曝に対する）有用物質をスクリーニングする。（プロバイオティクススクリーニング法の確立）

〈研究意義〉様々な外的ストレス（放射線、老化等）に対してより高い生体防護機能を有する有用物質を効率的にスクリーニングすることができるようになる。このことにより、放射線被曝線量の高い宇宙飛行士、さらには一般人に対する健康維持、増進に有用な物質の発見、開発に寄与することが可能となる。

⑤〈研究内容〉様々な生物種、およびその生体防護機構（DNA 修復系、抗酸化系など）欠損突然変異株へ高 LET 放射線を照射し、種々のエンドポイントにおける影響を解析し、低 LET 放射線である γ 線、X 線、陽子線照射による影響と比較する。

〈研究意義〉高 LET 放射線の生物界全体に対する影響に関する基礎的知見を得、各生物の放射線に対する感受性に関与する生体内機構を明らかにすることができる。さらに、それらの知見を統合することにより、環境への放射線影響、および生物の外的ストレス防護機構の進化について統合的に理解を深めることができる。

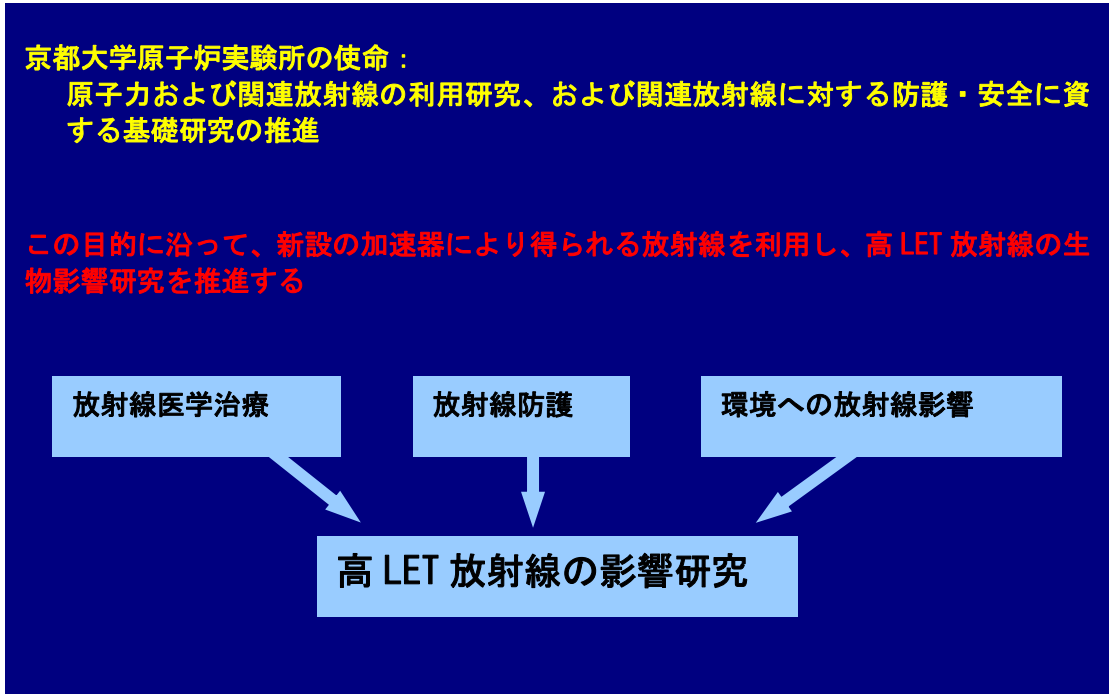
⑥〈研究内容〉各種生体分子（DNA、タンパク質、脂質等）に高 LET 放射線を照射し、各生体分子の損傷過程を γ 線、X 線、陽子線照射によるものと比較する。また、それらの損傷に対する生体防護物質の影響についても比較する。

〈研究意義〉高 LET 放射線の生物影響に関する基礎的知見を得るとともに、生体防護機構の解明につながる。

まとめ：

京都大学原子炉実験所は原子力および関連放射線の利用研究、および関連放射線に対する防護・安全に資する基礎研究を推進することが求められている。この要求に応えるためにも、当実験所における放射線生物照射研究、放射線生物影響研究の今後の方向性として、新設の加速器により得られる放射線を利用した高 LET 放射線の生物影響研究を推進することは重要であると考えられる。

最後に、本研究提案の概念図、および各研究カテゴリーに必要な線量率、加速器スペックについてまとめた図を示す。



第 1 0 3 図 研究提案概念図

		エネルギー				電流	加速器
医学治療	中性子	100 - 10000 nGy/rin				~1mA	サイクロ LINAC
	陽子	10 - 100 Gy/rin				~10nA	FRAG
	重粒子	100 - 10000 Gy/rin					
防護	中性子	100 - 10000 nGy/rin				~1mA	サイクロ LINAC
	陽子	10 - 100 Gy/rin				~10nA	サイクロ FRAG
	重粒子	100 - 10000 Gy/rin				~10nA	サイクロ
環境の暴露	中性子	100 - 10000 nGy/rin				~1mA	サイクロ LINAC
	陽子	10 - 100 Gy/rin				~10uA	サイクロ
	重粒子	100 - 10000 Gy/rin				~10uA	サイクロ

第 1 0 4 図 各研究カテゴリーに必要な線量、加速器スペック

8. まとめ（川端）

1年間にわたって、小委員会活動として研究炉利用活性化の方策及び加速器中性子源の概念について検討を行ってきた。

KUR 利用活性化の議論からは、実際の装置改良等の提案が行われ、それらが原子炉実験所の概算要求案等に反映される等、研究活性化活動に結実しつつある。今後さらに、より具体的かつ実現可能な提案を行うべく議論を進めていきたい。

また加速器中性子源についても、所外研究者の要望等も踏まえた所内研究者からの提案の集約を行い、加速器構成及びターゲット・建屋等の第1次案の検討を行った。

現在提案されている研究計画や原子炉実験所の特徴から、まずは中性子利用を優先的に考え、予算的に可能であればさらに研究の発展性を考えつつ本格的な陽子利用にまで進めることが考えられよう。中性子強度を指標として考えると、現時点での第1案として、パルス中性子利用には Linac+FFAG が考えられ、連続中性子利用には、サイクロトロンよりもパルス利用の際に FFAG の入射器として利用された Linac を直接利用することが考えられる。ただし、この Linac のフルパワーを受けられるターゲットシステムの設計はまだできていないわけではなく、回転ターゲットの概念が提案されている段階である。この問題が解決すれば、さらに Linac を並列に追加し、中性子強度を2倍にすることも可能になるかもしれない。

また、今後陽子利用の積極的な研究提案が行われ、かつ予算獲得の可能性が出てきた場合にはサイクロトロンの採用も魅力的な提案となって来よう。

これまでの検討では、まだハード・ソフト共に輪郭が明瞭であるとは言えず、詰めるべき点が多い。特に研究計画はさらに魅力的なものにすべく検討する必要がある。また、新たな研究提案があれば柔軟に考慮すべきであり、さらにはそれらの研究に最適なハード設計を常に見直す作業が必要である。これらの検討は、まだまだ始まったばかりと言える。

来年度は、予算状況も勘案しつつ、研究計画の見直し、それに適合した加速器システムの検討、さらにはターゲットや実験装置の技術的な成立性や最適設計へと検討を進めていきたい。

添付

複合原子力研究推進小委員会名簿

小委員長：川端祐司

委員：中島健、宇根崎博信、三沢毅、石禎浩、谷垣実、田中浩基、八島浩、日野正裕、杉山正明、瀬戸誠、谷口秋洋、桜井良憲、高宮幸一、卞 哲浩、徐 虫 L、田崎誠司（京大工・原子核）、安部豊（京大工・原子核）

サブ委員会構成

ADSR 研究検討ワーキンググループ

とりまとめ：三沢

検討メンバー：中島、宇根崎、大井川、卞、川端

加速器中性子源検討ワーキンググループ（先頭が担当とりまとめ）

全体とりまとめ：川端

加速器：石、谷垣

ターゲット・減速材周り：日野、田中、八島、田崎、安部

中性子ビーム利用：杉山、日野

照射・RI 利用（p 利用を含む）：瀬戸、谷口、桜井、田中、徐、高宮

KUR 利用活性化検討ワーキンググループ

とりまとめ：杉山

検討メンバー：柴田、義家、山名、瀬戸、川端、高宮、日野、田中