

理研和光における 小型中性子源計画

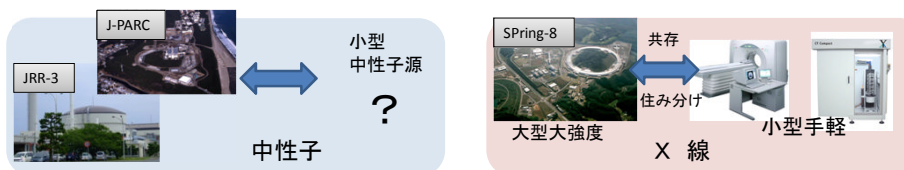
(独)理化学研究所
ものづくり高度計測技術開発チーム 山形 豊

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

1

なぜ小型中性子源なのか

- 近年J-PARCなどの大型中性子源の整備が世界的に進む一方で、小型の中性子源は極めて少なく、中性子線源の数は極めて限られている。
 - ユーザ層がうすい、利用頻度が低い、自由度が低い の3重苦状態
 - 日本中性子科学会でも小型中性子源の開発の重要性を認識している



小型中性子源は、強度は低いものの...

- 中性子ラジオグラフィー(静止画)では、十分な精度が得られる
- パルス分光イメージングにより、金属材料の歪(応力測定)、元素分析、温度測定などが可能
- 小角散乱、反射率、回折散乱実験などの物質構造解析に適応可能
- 検出器の開発・試験にも適する

将来的には、大企業は社内に設備を所有し大学や公設試でも運用可能な小型かつ運用の容易な小型中性子線源のモデルケースとなり得る。

米国には既に小型中性子源が稼働しており(インディアナ大学)、中国では2つの計画(清華大学、北京大学)が同時進行中。

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

2

小型中性子源施設の例

北大ライナック

40MeV(1kW)の電子線ライナックを用いた中性子源
J-PARC TMR開発のみならず、パルス中性子源の基礎的な研究開発に大いに貢献



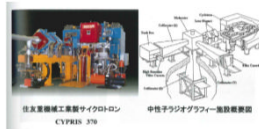
Indiana大学

13MeV 13kW?(現状は4kW程度)陽子線ライナック
SNSの予備実験施設として、サイクロトロンエンジニアクターを利用して開始



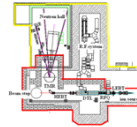
住重検査

18MeV 0.9kW陽子サイクロトロンによる中性子源
元来は、イオン注入設備を改造して利用。1980年代より運用



清華大学

13MeV 13kW (Indiana大とほぼ同じスペック)陽子線ライナック
物理学教室の教育が主な目的か?コンポーネントはすべて自作している。北京大学、中山大学でも計画進行中(?)

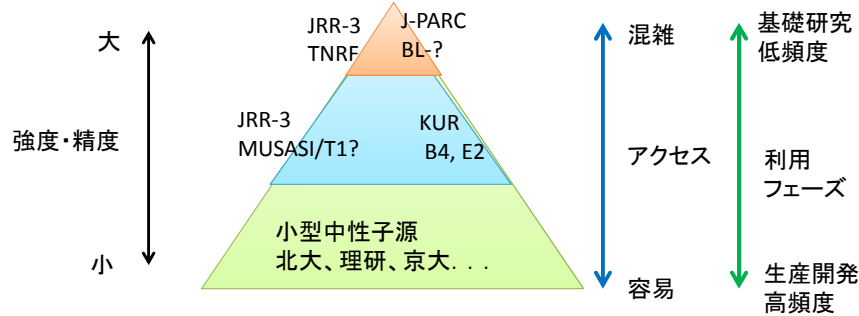


中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

3

小型中性子源の位置づけ

- アクセスが容易な中性子イメージング設備の拡充



- 具体的なアプリケーションに特化したイメージング手法の開発
 - 大型施設(デパート) ↔ 小型線源(専門店)
- 計測手法や画像処理手法の開発
 - 供用利用されている施設では、大幅な改造は容易では無い
 - 頻繁な更新により手法確立を進める

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

4

理研プロジェクトの狙い

- 低エネルギー・大電流加速器により中性子を発生

- 加速器の小型化
- 放射線遮蔽の小型化
- 放射化物発生量の低減
- 容易な運転管理
- 長寿命ターゲットの開発

大規模研究所だけではなく、大学、公設試、企業内で設置可能な規模と価格を目標

- 小型線源に適したアプリケーション開発

- ものづくり分野の企業との初期からの連携
- 理研 物質構造解析ユーザーとの連携
- イメージング画像処理等のソフトウェア開発
- 可搬型中性子源への展望
- 低フラックスでも可能な分析手法の探索・開発
- 光学素子の活用

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

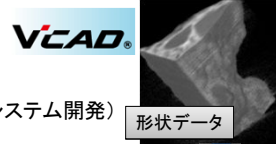
5

理研の中性子関連要素技術

- ラジオグラフィー画像(物性情報を含む)のVCADシステムによる解析

<http://vcad-hpsv.riken.jp/>

- メッシュ化+シミュレーション、画像処理、3次元形状処理
- 放射線移送シミュレーションコード(PHITS)とVCADの連携
- 土木研究所との研究協力協定(大型構造物健全性診断システム開発)
- ものづくり関連企業との協力関係の継続



形状データ

- 中性子光学素子を用いた分析装置

- 集光型小角散乱装置のミラーは理研で加工、複数の特許が存在

- 検出器の開発実績

- パルス分光型イメージングによるピクセル型検出器



中性子ミラー



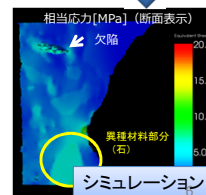
集光型小角散乱装置 (JRR-3ガイドホール)



RPMT検出器 (理研ベンチャーより販売)

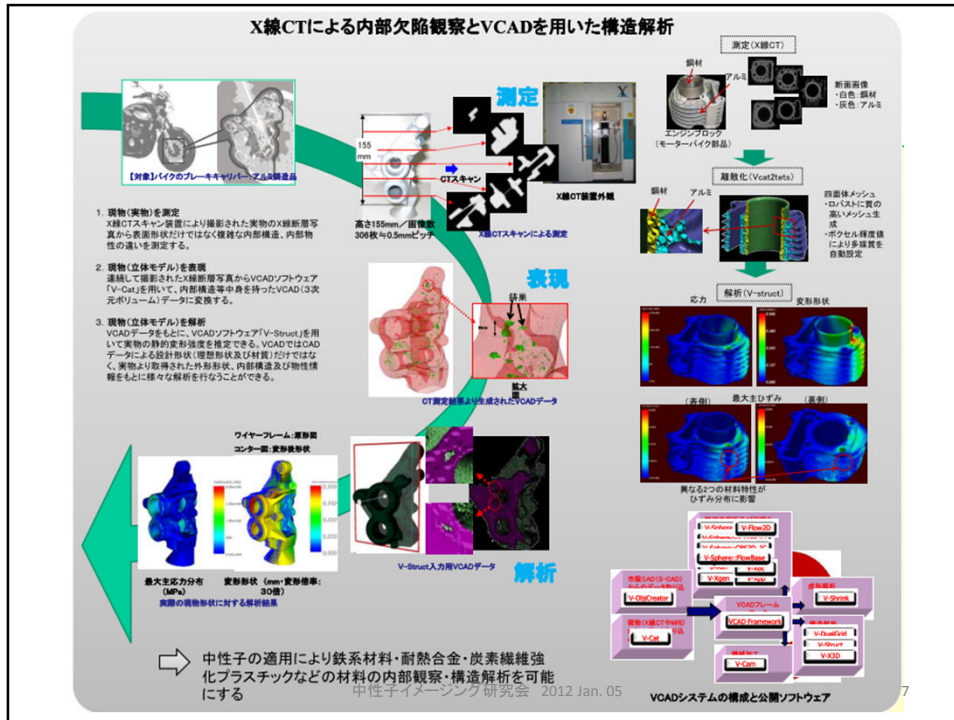


VCADモデル化



シミュレーション

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05



ものづくり分野の応用

- 近年のものづくり分野における状況
 - アジア諸国の台頭によるコスト競争
 - CO2削減などの省エネ化要求
 - PL法、リコール問題による信頼性確保

バッテリー発火事故 タイヤリコール問題

こうした相反する問題に対処しなければならない困難な状況にある。

観察対象物

- 車軸・サスペンションアームなどの内部応力の観察
- バッテリー・燃料電池の安全性検査
- プラスチック・ゴムと金属の複合材料の検査



小型中性子源による非破壊検査技術の貢献

タイヤ

- 基礎研究では無く開発段階における高頻度測定(大型施設では困難)
- バッテリーなどの破壊検査
- 秘密保持性
- 将来的な社内設備としての検討

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

航空宇宙分野における応用

航空機関連

- タービブレードの検査
- CFRP機体、翼の品質検査、破壊試験結果の調査

複合材(CFRP)を多用した
省エネ航空機



宇宙関連

- 分離ボルト等火口品の検査
- 衛星推進系部品の検査
- 推進系の燃料循環・噴射実験

ジェットエンジン

タービブレード

航空宇宙関連のコンポーネントは重要
基幹部品の輸入品の割合がかなり有り、
秘密保持契約等の関係で事故・失敗原因
の究明が不可能なケースも多い

- H-IIロケット
- 分離ボルト(火口品)の検査
- 衛星スラスターの試験 (JAXA)

これらの非破壊検査は、他に代替可能な手法が無いだけでなく、
国内で検査することに大きな意義がある。

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

9

物質構造解析分野の応用

- 中性子小角散乱は、ナノスケールの不均質構造の平均値をサブナノメータで決定できる手法である。
 - 高分子材料、鉄鋼材料、耐熱合金、磁性材料などの分野で大きな成果を上げている。

集光型小角散乱装置は、中性子光学素子を用いた新しい分析手法で、従来の数分の1以下の大きさで、高いビーム利用効率を得られる。



JRR-3 SANS-U
(長さ16m)

mf-SANS(約1.5m)

小型中性子源に最適

多くのユーザーの利用が見込める

JRR-3 mf-SANSの集光ミラーは理研で設計・加工を行ったものである。

鉄鋼・高分子化学・磁性材料などのメーカーとの協力、物材機構との協力を念頭に活動する。

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

10

和光における小型中性子源の活用

物質構造解析ユーザの利用の可能性

- 小角(中角)散乱(SANS: Small Angle Neutron Scattering)
 - 中性子光学素子を活用することで、有意義な解析を比較的短時間で実現できる可能性。
- 粉末回折(Powder Diffractometer)?
 - ある程度生成量が見込まれる物質
- 反射率計?
 - 静的な測定
- 単結晶回折??
 - ビーム強度を考えると高精度なデータは望めないが、予備的測定は可能か?



近くですぐに計れるメリット

- 不安定なサンプルを海外まで移送して実験するのは大変な労力を要し、リスクも大きい。
- 現状では、多くの理研の先端的な研究成果を海外の施設で測定しており、これは研究成果の流出につながりかねない。
- 小型中性子源で、精度は低くとも最初のデータを出すことができれば、研究のプライオリティは保てる。

小型装置の意義

- 大強度施設の精度は極めて重要だが、初めて測定する物質を1回のビームタイムで成功させるのは至難の業。
- 再トライが何回もできる小型中性子源での予備的な測定は極めて重要。
- 小型中性子源で有意義なデータを得るには、光学素子の活用などの大強度施設とは異なるアプローチも重要。

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

11

大型構造物分野の応用

- 橋梁等の大型構造物は、高度成長期に大量に建造されており、10~20年後には大量の公共インフラが寿命(60年以上)を迎える。

現状の日本の公共事業費では、全ての橋梁・高速道路等を新造することは不可能。

橋梁の損傷状況を事前に詳しく診断し、予防保全によって延命(~100年)を図ることが不可欠。

日本全国には15m以上の橋梁が15万橋存在



ミネアポリスの落橋事故 (2007米国)



木曾川大橋のトラス破断事故 (2007年 日本)

そのためには、

1. 部材の損傷状況から、載荷余裕度を定量的に見積もるシミュレーション技術
2. 橋梁等の大型構造物の内部を現場で非破壊的に検査する技術

の開発が必須である。

- 小型中性子源(実験室レベル)は、VCADによるシミュレーションと組み合わせて1.の各部材の透過観察に
- 可搬型中性子源は、2.に適応可能と考えられる。

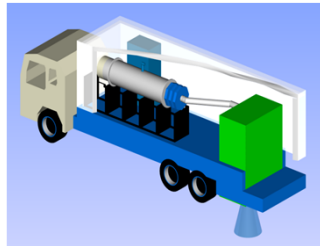
大型構造物の非破壊検査には、高速中性子ラジオグラフィーが適すると予測される。

12

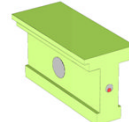
可搬型中性子源の可能性

- 放射線障害等防止法第10条 および 関連規定(平成17年7月改定)
 - 橋梁等の非破壊検査に用いる直線加速器で4メガ電子ボルト以上のエネルギーを有する放射線が発生しないものは、放射線発生装置の使用の場所の変更を都度許可を得る必要がなく届出で足りることとする。(ただし、設備については、事前に文部科学大臣の許可が必要。)

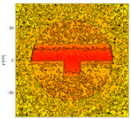
PHITSによる橋梁の非破壊検査シミュレーション



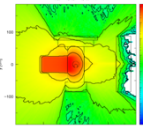
3.5MeV陽子ライナックを搭載した可搬型中性子源の想定図



モデルとしたPC橋梁(厚さ50cm)



TOFによるイメージの鮮明化



遮蔽の検討:
約70cmのホウ素化ポリエチレンで3MeV 10^{16} n/secの中性子線を $1.25\mu\text{S/h}$ まで減衰可能と予測される。

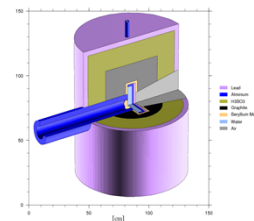
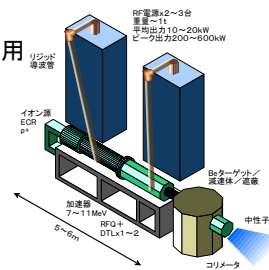
上記の規定が中性子線が発生する設備に適用可能かどうかはまだ議論があるが、適切な遮蔽により放射線レベルを放射管理区域境界 ($1.25\mu\text{S/h}$)まで下げれば可能性はあると考えられる。

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

13

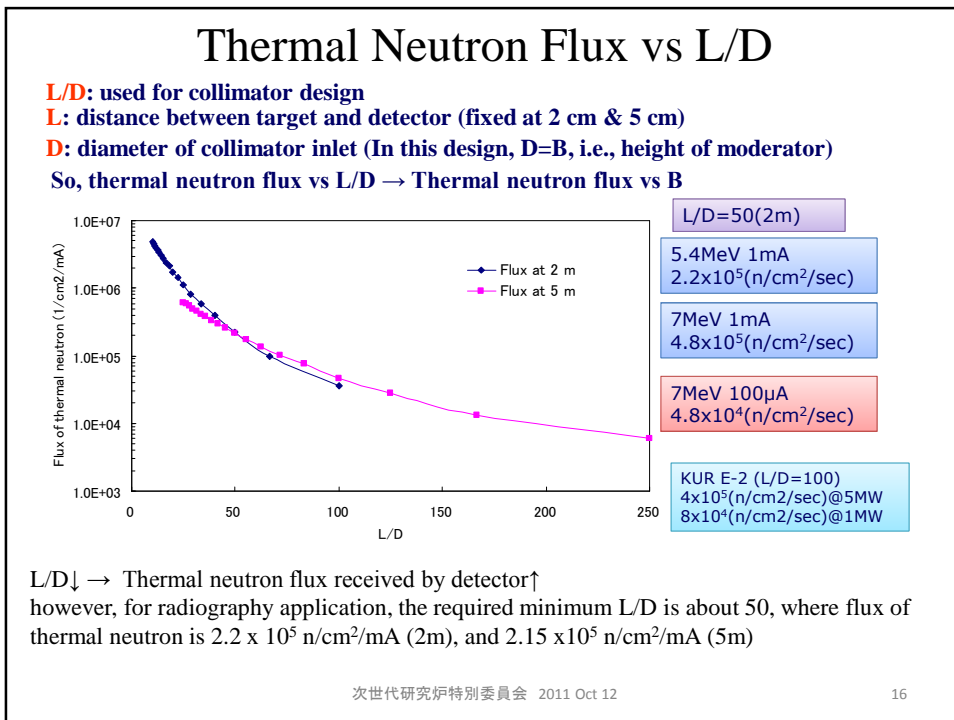
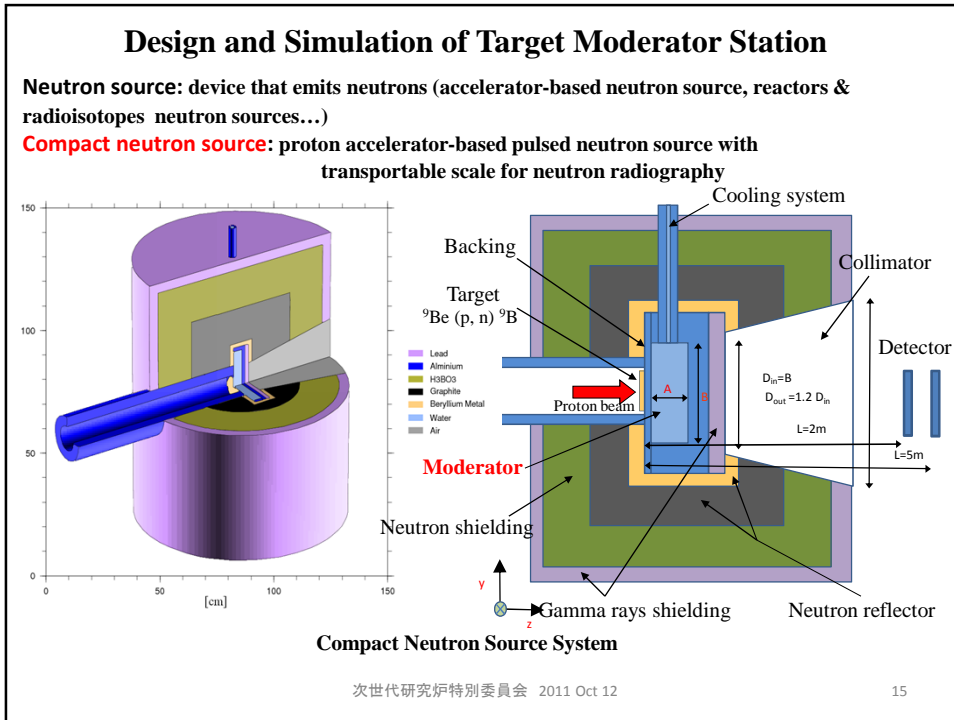
理研の小型中性子源計画

- 特長
 - 陽子線ライナック、低エネルギー核反応Be(p,n)を利用
 - 7MeV、100 μA
 - 遮蔽が小型化(自己遮蔽可能?)
 - 可搬型にも適用可能(?)
- 技術的課題
 - 高耐久性ターゲット(Be)の開発
 - 長寿命ターゲットの開発
 - 低放射化によるメンテナンスの容易化
 - 減速体の最適化
 - 高フラックス化、短パルス化のバランス
 - Mesitylene を用いた冷中性子源
 - 小型・低コストな遮蔽体のデザイン
 - 複層型遮蔽をデザイン中



中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

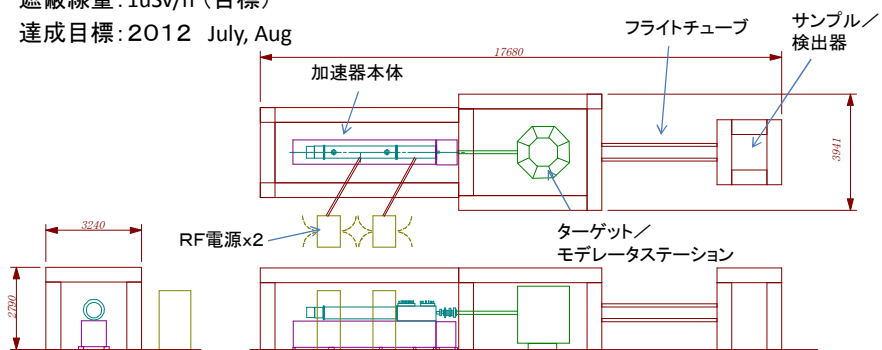
14



第一次レイアウト案

- 加速器: 7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet
- RF電源: 350kW(peak) duty 8%
- 必要用電力: 電力 40kVA, 冷却水: 75L/min
- 中性子発生量: 10^{12} (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子ビームラインx1(ラジオグラフィー)
- 設置寸法: 18m x 4m x 2.7m
- 遮蔽線量: 1uSv/h (目標)
- 達成目標: 2012 July, Aug

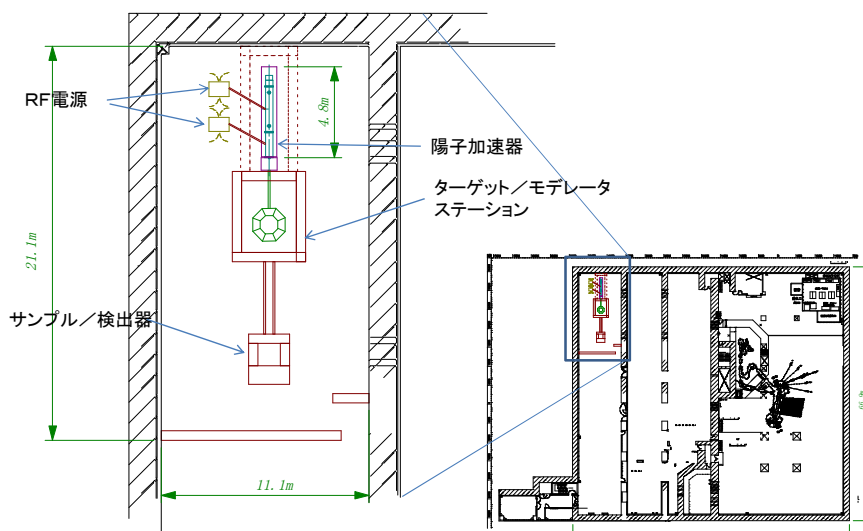
直線状に配置し、
早期の立ち上げを
目指す。



中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

17

RIBF棟レイアウト案



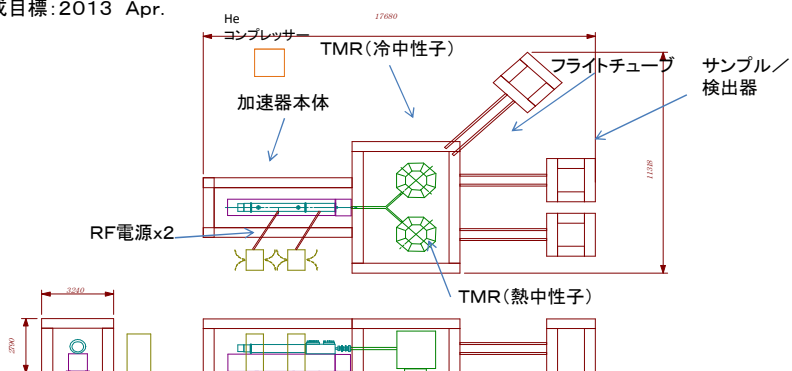
2012年夏頃の熱中性子ビームラインを想定

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

18

第2次レイアウト案

- 加速器:7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet 付き
- 必要用力: 電力 40kVA, 冷却水: 75L/min
- RF電源:425MHz 350kW(peak) duty 8%
- 中性子発生量: 10^{12} (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子x1(ラジオグラフィ)、冷中性子x2(小角散乱、パルス分光)
- 設置寸法: 18mx11mx2.7m
- 遮蔽線量: 1uSv/h(目標)
- 達成目標: 2013 Apr.



中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

19

項目/年次	2011	2012	2013	2014	2015
陽子線加速器	→	試験運転 → 熱中性子ビーム	→ 冷中性子ビーム		
用力工事	→	電気・冷却水・クレーン → 熱中性子ビーム発生			
ターゲット/モデレータステーション(熱、冷)	→ シミュレーション → 詳細設計 → 素材調達	→ 冷中性子源 シミュレーション → 組み立て	→ 冷中性子源 詳細設計 → 組み立て		
放射線発生施設許可申請	→ 申請	→ 施設検査	→ 変更申請	→ 施設検査	
熱中性子ラジオグラフィ			→	→	→
小角散乱				→ ビンホール型	→ 集光型
粉末回折			→ 予備実験		→
光学素子開発	→ 基礎的試作		→ 集光ミラー製作		
検出器開発	→ CCDカメラ	→ パルス対応型	→		

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

20

大電流型小型中性子源 (将来計画)

- 7~10.5MeV 陽子 3mA (peak: 40mA)
- 7~10MeVの陽子線ライナックを用い、Be(p,n)反応で中性子を発生
- 熱・高速中性子向けターゲットステーションと冷中性子用ターゲットステーションを構築
- およそ10x20mのスペースに熱・高速中性子用TMRと冷中性子用TMRを設置

中性子発生量:
10¹³~10¹⁴(n/sec)

加速器所要電力: 最大約280kVA(推定)
RFアンプ: Klystrode
7MeV 陽子 3mA (peak: 40mA), pw 10us~1ms

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

21

小型中性子源の利用、普及

中性子イメージング研究会 2012 Jan. 05

22

ご静聴ありがとうございました。