

令和 6 年度

京都大学複合原子力科学研究所

将来計画短期研究会 報告書

令和 7 年 2 月 14 日開催

京都大学複合原子力科学研究所

目次

1. 開会挨拶	(京大複合研) 黒崎 健	… 1
第一部／研究所の将来計画		
2. MKB 委員会での議論	(京大複合研) 杉山 正明	… 3
第二部／活躍するフロンティア研究者		
3. フロンティア研究プロジェクトでの研究進展	(京大複合研) 奥田 綾	… 9
4. フロンティア研究プロジェクトでの研究進展 質疑応答	(京大複合研) 慈幸 千真理	… 16 … 22
第三部／KUR に頼らない教育と研究、複合研での展望		
5. 多彩な加速器を使った教育と研究 質疑応答	(京大複合研) 田中 浩基	… 24 … 29
6. KUCA の燃料低濃縮化と将来計画 質疑応答	(京大複合研) 宇根崎 博信	… 30 … 37
第四部／廃止措置に関する教育と研究、良好事例の紹介		
7. 東北大学の取り組み (招待講演) 質疑応答	(東北大学) 渡邊 豊	… 38 … 46
8. 東京大学の取り組み (招待講演) 質疑応答	(東京大学) 斉藤 拓巳	… 48 … 55
第五部／全体討論		
9. 全体討論		… 57
10. 閉会挨拶	(京大複合研) 杉山 正明	… 66
<hr/>		
令和6年度 京都大学複合原子力科学研究所 将来計画短期研究会 プログラム		… 68

1. 開会挨拶

(京大複合研) 黒崎 健

開会挨拶

皆様おはようございます。今日は将来計画短期研究会ということで、プログラムを考えました。第一部は、杉山教授から、将来計画を議論している MBK 委員会の議論内容を中間報告としてご紹介頂きます。次いで、フロンティア研究者に注目したセッションを設けました。当研究所で、若い研究者が自律的・自由に研究できる環境整備を目的として、数年前にフロンティア研究プロジェクトを立ち上げました。そこでは、若手研究者が PI として研究室運営をしながら研究されています。准教授の奥田先生と慈幸先生から研究の進展と内容についてご報告いただきます。

午後の第三部は「KUR に頼らない教育と研究、複合研での展望」というテーマを。中心的な存在である KUR の運転停止が目の前に来ている。1つはその代替中性子源になりうる「多彩な加速器施設を使った教育と研究」を田中教授から。もう1つは KUCA です。当研究所には原子炉が2つあり、その1つの KUCA は現在燃料の低濃縮化を進めています。低濃縮化後に何を進めていくかもあわせて宇根崎教授からお話頂きます。

第四部は KUR の廃止措置に絡めての話。既に研究炉の廃止措置、あるいは日本におけるもっと大きな廃止措置の良好事例がございまして、東大の斉藤先生と、東北大の渡邊先生にそれぞれの大学での取り組みについてお話頂き、我々が将来計画を立てるときの参考にさせて頂ければと思っています。

最後の第五部は全体討論です。今回は趣向を変えまして Google Form で 15 時まで質問を受け付けます。どんなことでも良いです。こちらで選んで回答させていただきます。

ではどうぞよろしく願いいたします。

京都大学複合原子力科学研究所
所長
黒崎 健

2. 第一部／研究所の将来計画

MKB委員会での議論

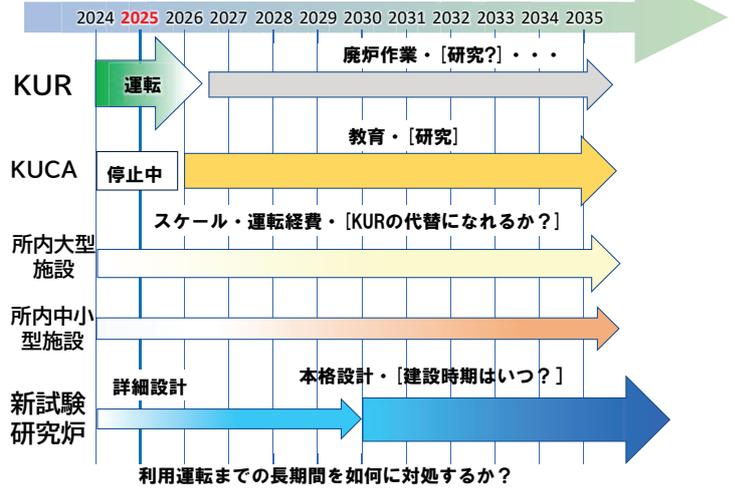
(京大複合研) 杉山 正明



京都大学複合原子力科学研究所 将来計画委員会 Make KURNS Better! = MKB委員会 中間報告書作成中

杉山 正明

研究所のこれからの10年間



当初スケジュール

Phase 1: 現状認識+共通化(2023年度)

- 本研究所の問題点
 - 1.1. 施設のな問題点
 - 1.2. 学術的な問題点
 - 1.3. 組織運営上の問題点
- 本研究所利点
 - 2.1. 施設のな問題点
 - 2.2. 学術的な問題点
 - 2.3. 組織運営上の問題点
- 本研究所リソース=持っているもの
- 本研究所の目指すもの
- 所内インタビューによる補強

これらの議論から得たいもの
「我々は何であるか?」
「我々は何を目指すべきなのか?」

- Phase 2: 将来計画検討・立案(2024年度)
- Phase 3: 将来計画実現化活動(2025年度以降)

多くの所員の方から将来構想をお聞きし、全所員の方がMKBの活動に実質的に参加して頂くことを望んでいます→いつでもご意見を

MKB構成

委員	井上 倫太郎	
	奥地 拓生	
	杉山 正明	委員長
	日野 正裕	
	堀 順一	
	八島 浩	
	渡邊 翼	
事務	岩瀬 智博	
	オブザーバー	黒崎 健
		三澤 毅
		奥村 東

詳細検討班構成

ハード班	日野 正裕	班長
	堀 順一	
	八島 浩	
ソフト班	井上 倫太郎	
	奥地 拓生	班長
	渡邊 翼	

Phase 1 活動

- 第1回MKB委員会 2023/07/26
研究所の歴史と研究所の現状認識・分析(人員・予算・共同利用・論文数・科研費・外部資金)
ハード班: 所内大型施設からの視点による現状分析・将来可能性の探索
ソフト班: 所内研究活動からの視点による現状分析・将来可能性の探索
- 第2回MKB委員会 2023/09/21
各班の検討結果発表及び討論
各班にて再検討会
- 第3回MKB委員会 2023/11/07
クロストーク検討1
ソフト班からの意見: ハード班の検討結果を踏まえて
- 第4回MKB委員会 2023/11/22
クロストーク検討2
ハード班からの意見: ソフト班の検討結果を踏まえて
- 第5回MKB委員会 2023/12/13
- 将来計画短期研究会 2024/2/2

Phase 2 活動

- MKB-PI会議 2024/5/21
【ハード系】確認・確認事項(7項目提示)
1. 今後の基本哲学は何か?(旗印)
2. どの大型装置を残すか?
3. その装置で何をやるか?(学術的価値)
4. それをどのように運用するか?(資金・人員)
5. 所内のソフト系とどう融合するか?
6. 廃炉・革新炉・新試験研究炉とどう向き合うか
7. 所外との連携はどのように進めるのか(現実論で)
- 【ソフト系】確認・確認事項(7項目提示)
1. 今後の基本哲学は何か?(旗印)
2. どの研究を発展させるか?
3. それをどのようにして行うか?(資金・人員)
4. 学術成果を生み出す方策は(論文数・科研費採択率の少なさ)
5. 所内のハード系とどう融合するか?
6. 廃炉・革新炉・新試験研究炉とどう向き合うか
7. 所外との連携はどのように進めるのか(現実論で)
- 第1回MKB-II会議 2024/8/1
- 第2回MKB-II会議 2024/12/19
- 第3回MKB-II会議 2025/1/29
- 将来計画短期研究会 2024/2/2
- 第3回MKB-II会議 2025/2/27

現状分析



複合原子力科学研究所敷地

敷地面積:約10万坪

施設系の分析

1. KUR: 2026年5月運転停止。廃止措置に移行。
2. KUCA: 低濃縮化後、教育+研究に有効に利用
3. Co-60: 利用停止。廃止措置に移行
4. LINAC: 高経年化の懸念はあるが今後も利用価値が高い
5. HL: 改修の計画もあり、有効利用の可能性は高い
6. 30MeV Cyclotron: 遮蔽強化等のテコ入れが必要
7. 150MeV FFAG(将来計画では対象から外れている)
8. Tracer: 今後も利用価値が高い

課題は？

- KUR: 廃炉措置を研究に展開できるか？
- KUCA: 教育から研究にも展開するか？
- LINAC: 高経年化対策の論理
- HL: 改修の論理・価値の創造
- 30MeV Cyclotron: 遮蔽強化等の論理
- Tracer: 利用法検討

将来計画において
所内の論理だけでなく、外部も納得させられるだけの期待できる成果とその価値の提示が重要

論文データから見た 複合原子力科学研究所の研究状況

2023年7月24日

学術研究展開センター (KURA) IR担当
ir@kura.yoto-u.ac.jp

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



論文指標から見た特徴: KURAの資料より

9

	論文数	相対被引用度 (CNCI)	Top10% 被引用論文割合 (Q値)	Top25%ジャーナル掲載論文割合 (Q1)	国際共著論文割合	産業界との共著論文割合
複合研	755	0.8	6.09%	50.12%	30.46%	9.14%
京都大学 (全体)	43,324	1.14	10.43%	34.95%	35.23%	5.21%

論文数およびTOP10%被引用論文数の推移



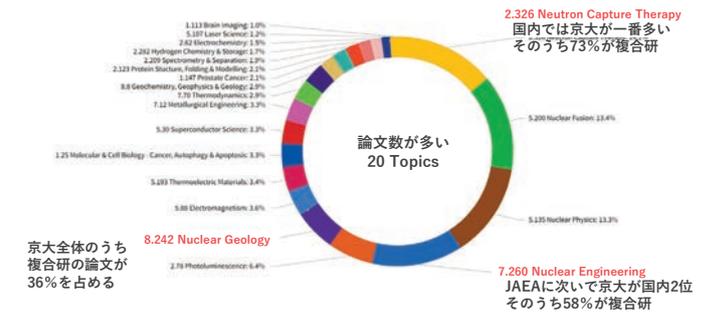
成果はあるが十分とは言えない

対象期間 : 2018-2022
データベース : Web of Science
分析手法 : Incites Benchmarking を利用
データ更新 : 2023年5月

KYOTO UNIVERSITY

出版論文の分野 (Citation Topics, Mesoレベル, 326分野) : KURA資料より

10

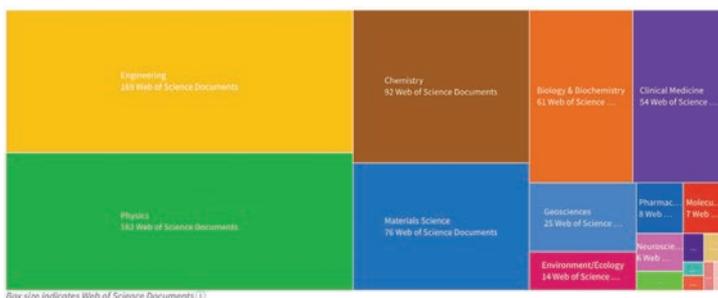


Citation Topicsとは
論文の引用関係から作成したある程度の論文集合に、共通する重点的なキーワードをつけたもの。既存の分野分類はジャーナル毎にカテゴライズされるのに対し、Citation Topicsは各論文につけられるためより論文内容に近い分野(トピック)へ分類されると考えられ、より細かいキーワードで見ていくことが可能。Micro (2444), Meso (326), Macro (10)の三つのレベルで階層的に分類されている。
参考: <https://incites.help.clarivate.com/Content/Research-Areas/citation-topics.htm>

KYOTO UNIVERSITY

出版論文の分野(ESI): KURAの資料より

11



Indicators: Web of Science Documents, Time Period: 2018-2022, Department Name: OrgMatch_Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Schema: Essential Science Indicator
Dataset: My Organization Dataset
Incites dataset updated: Jun 30, 2023. Includes Web of Science content indexed through May 31, 2023. Export Date: Jul 24, 2023.

多様な分野での活動が行われている!

KYOTO UNIVERSITY

成果系(論文+外部資金etc)

1. 論文発表(件数): 多くはない
2. 論文発表(質): Top10%も含め、High IFも出ている
3. 論文(その他特徴): 分野は多岐に渡っている
4. 研究費(科研費): 採択率は低い
5. 研究費(総額): 少なくはない(受託・創発・CREST・AMED等)

課題は？

- 研究活性化の方策
- 研究所の多様性の活用
- 研究費獲得—論文発表のサイクル化
- 一部の分野だけでなく所全体での活性化

- 将来計画において
- 安全管理体制との共存
 - 人材有効活用
 - 評価軸の設定が必要
 - 所内施設の更なる活用
 - 外部施設との連携策

利用価値のある施設

1. KUR: 2026年5月運転停止。廃止措置に移行。
2. KUCA: 低濃縮化後、教育+研究に有効に利用
3. Co-60: 利用停止。廃止措置に移行
4. LINAC: 高経年化の懸念はあるが今後も利用価値が高い
5. HL: 改修の計画もあり、有効利用の可能性は高い
6. 30MeV Cyclotron: 遮蔽強化等のテコ入れが必要
7. 150MeV FFAG(将来計画では対象から外れている)
8. Tracer: 今後も利用価値が高い

多様な分野での研究活動!



Bar size indicates Web of Science Documents.

1. 我々は何であるか

研究炉および種々の装置を用いて積み重ねてきた
多様な放射線・放射性物質を用いた装置・測定技術
およびこれらを用いた最先端学術研究を行う専門家
集団である

2. 今後どうあるべきか

多様な放射線・放射性物質を用いること専門家同士
の分野を超えた協業・共創によるこれまでの学術の
発展・新たな学術の創成を目指す
→複合原子力科学のさらなる推進

一部を除いて、「集合原子力科学」ではなかったか?

- 施設としては共同利用・研究拠点を維持を目指す。(大型ではなく)
- 施設のみならずソフト(試料作成等)の独自性も伸ばす
- 上記の目的のため所内施設の再活性化・外部施設との連携構築
- 放射線および原子力関連教育

Phase 1 活動

1. 第1回MKB委員会 2023/07/26
 - 研究所の歴史と研究所の現状認識・分析(人員・予算・共同利用・論文数・科研費・外部資金)

ハード班: 所内大型施設からの視点による現状分析・将来可能性の探索
ソフト班: 所内研究活動からの視点による現状分析・将来可能性の探索
2. 第2回MKB委員会 2023/09/21
 - 各班の検討結果発表及び討論

各班にて再検討会
3. 第3回MKB委員会 2023/11/07
 クロストーク検討1
 - ソフト班からの意見: ハード班の検討結果を踏まえて
4. 第4回MKB委員会 2023/11/22
 クロストーク検討2
 - ハード班からの意見: ソフト班の検討結果を踏まえて
5. 第5回MKB委員会 2023/12/13
6. 将来計画短期研究会 2024/2/2

Phase 2 活動

1. MKB-PI会議 2024/5/21
 【ハード系】確認・確認事項(7項目提示)
 1. 今後の基本哲学は何か?(旗印)
 2. どの大型装置を残すか?
 3. その装置で何をやるか?(学術的価値)
 4. それをどのように運用するか?(資金・人員)
 5. 所内のソフト系とどう融合するか?
 6. 廃炉・革新炉・新試験研究炉とどう向き合うか
 7. 所外との連携はどのように進めるのか(現実論で)
- 【ソフト系】確認・確認事項(7項目提示)
 1. 今後の基本哲学は何か?(旗印)
 2. どの研究を発展させるか?
 3. それをどのようにして行うか?(資金・人員)
 4. 学術成果を生む出す方策は(論文数・科研費採択率の少なさ)
 5. 所内のハード系とどう融合するか?
 6. 廃炉・革新炉・新試験研究炉とどう向き合うか
 7. 所外との連携はどのように進めるのか(現実論で)
2. 第1回MKB-II 会議 2024/8/1
3. 第2回MKB-II 会議 2024/12/19
4. 第3回MKB-II 会議 2025/1/29
5. 将来計画短期研究会 2024/2/2
6. 第3回MKB-II 会議 2025/2/27

ハード班より (Phase 2)

1. 基本哲学

- 研究炉および種々の装置を用いて積み重ねてきた
「多様な放射線・放射性物質を用いた装置・測定技術及びこれらを用いた最先端学術研究を行う専門家集団」である。
- 装置・測定技術開発及び学術研究は、
「所内外の共同研究および独自研究」
によって推進されてきた。

今後も京都大学の基本理念を意識し、研究教育活動を行う。
上記、多様な放射線・放射性物質に関する専門家集団として
学術研究力の強化と組織(施設)の管理(責任)維持が重要項目

組織としてKUR廃炉措置を中心に原子力施設管理に努力をかけねばならない現状を踏まえ、(今後研究で立つためにも)、広義の原子力分野は広く、具体的に、目指す「複合原子力」研究の可視化が必要
⇒特に所内施設としては、KUCAとHL。

2. どの大型装置を残すか?

共同利用共同研究拠点(共共拠点)であることが自由な研究をする場を維持する上で重要、大型施設の現状確認と今後を検討
 ○ KUCA(低濃縮化後進行中。有効利用の期待と義務が大きい) → 第三部(宇根崎先生)
 ○ 30MeV Cyclotron(遮蔽強化等のテコ入れが必要) → 第三部(田中先生)
 ○ LINAC(高経年化の懸念はあるが今後も利用価値が高い) → 第三部(田中先生)
 ○ HL(利用ニーズは高く、ポストKURの利用計画を検討中)
 ○ Tracer(今後も利用価値が高い)

- KUR(2026年4月23日の運転終了。廃止措置計画策定等準備を進めている)
- Co-60(利用停止。廃止措置に移行している)
- 150MeV FFAG(将来計画では対象から外れている)

1. KUCA, Cyclotron, LINACの3中性子発生装置は熊取サイトの共同利用の中心。
2. HL, Tracerも重要な施設で、ポストKURでの整備計画を明確にする必要。
特記
 - KUR停止⇒課題数減少⇒共共拠点としては問題
 - KURの「廃止措置」の位置づけ⇒(第四部の議論)
 - 上を踏まえると周辺装置(デバイス)での研究活性化が重要
 ⇒ソフト班の研究の方向との融合が重要なポイントとなる=複合原子力科学+熊取サイトの共同利用は必須だが、外部連携でそれを補う努力が必要。「もんじゅ」サイト新試験研究炉を軸に、WIN-WINの形で、JRR-3を主とする外部連携を充実させ、より広がるのある共共拠点を形をつくること等を本格的に開始する必要がある。

まとめ

●MKB(Make Better)の活動を進めてきた。残すべき(残る)5施設(30MeV Cyclotron, LINAC, KUCA, HL, Tracer)を重視し、ヒアリングを通じてエンカレッジしつつ、研究を主とするロードマップを明らかにするように心がけてきた
→現在も継続中＝後半部分で講演有(中間報告書に反映)。

●ハード班としては、でKUCA、Cyclotron、LINACの3中性子発生装置は熊取サイトの共同利用の中心と認識
●HL:重要な施設＝整備が必要＝定量的な計画必要。
上記はそのためのコストの評価と捻出法の検討が必要

新試験研究炉との関連

●熊取サイトの充実＋外部連携と研究力の強化
⇒新試験研究炉で結実を目指す

問題点:新試験研究炉プロジェクトは、狭義の原子力研究には直接リンクしない。「複合原子力研究」を明確にし出口に向かう研究との連携を検討すべきではないか？。

ソフト班より (Phase 2)

2023~24年度 MKBソフト班 議論まとめ

班の位置づけ 研究のアイデアから始まるボトムアップの立ち位置を大事に

班の役割 所の研究力強化法を検討してきた。概念的な課題は以下のとおり

- ・大型施設 サイクロ、電子線、他施設などの利用
- ・小-中型施設 共同利用施設として供している機器の利用
- ・組織のあり方 既存の人材の有効活用も
- ・研究力強化に資するシステムづくり

※複数の課題があり、それぞれの優先順位が微妙に異なるため、論点を明確にした上で(論点がずれないように)1つずつ解決する必要がある

所の役割の定義

・原子力だけに一本化しない形での再定義が良いのではないかな？

今後の所の方向

- ・教育について 全学・日本全国の放射線教育に貢献してきており、それが学生・教員が複合研に興味を持つ動機にもなっていた。
→教育に対する新たなアプローチも必要。海外学生の受入体制の整備など
- ・国際共同研究力の強化 野心のある海外若手研究者(+その卵)の受入
→研究所のスタッフが責任を持ってメンターを務める

今後の所の方向続き

- ・国内共同研究力の強化 大型に加えて**中小型装置の強化による研究力向上**
→(たとえ資金をかけなくても) **技術職員と教員とのインタラクション**で研究のレベルをそれなりに上げられるのではないかな
→**所内外の大型施設利用と連携**したい。マテリアル作成(熊取)から照射(含む他施設)までをうまくサポートできる体制の確立

具体的な提案としていくつか

1. **論文** 京都大学全体の英文原著論文の出版数は3.5~4本/年/定員内教員
→**筆頭and/or責任著者の英文原著論文**1本/年/定員内教員、各研究室3本/年を所内で目指すべき? 共著は多い研究室はあるが、個々からの筆頭/責任著者論文はまだまだ少ない。阻害要因があるとすれば所全体で対応が必要
2. **所内交流** **研究者交流の活性化は個人のアクティビティに向上つながる。**
地道ではあるが、たとえば飲食しながら研究について議論することが日常的にできれば、自分の研究の活性化や共同研究への発展につながる
3. **技術職員のコミットメント促進**:各研究室に訪問してもらい、研究者側からやってほしいことの需要アピールの機会を作る

ポストKURに向けた各分野の研究活動分析

放射線・量子線物質科学
奥地研・瀬戸研・木野村研・
谷口研・佐藤研

放射線医学(医学応用)
鈴木研・田中研・天満研

複合原子力科学 のピース

放射線・量子線生命科学
高田研・茶竹研・杉山研

環境理工学(放射化学)
藤川研・高宮研・福谷研

放射線・量子線・原子力工学
日野研・斎藤研・堀研・黒崎研・
三澤研・宇根崎研・山村研・石研

放射線・量子線物質科学分野 ※各分野長の意見を踏まえて作成/確認済(除佐藤研)

全分野ともに共同利用研究受入、理学/工学の学生受入は定期的に行っている。その上でさらに、研究科側で行い得ない**特徴的な実験的研究**—**“尖った”研究**—への学生の勧誘と受入を行い、各専攻の教育の幅を広げる貢献が望まれる

瀬戸研 放射光・RI利用メスバウアー分光 複合研の電子線型加速器・RI環境と購入線源による研究の継続と発展に取り組む。博士課程院生が近日中に学位取得予定。他にない研究所の環境を活かしつつ、次の種(γ線時間変調法)をつくりγ線の量子光学に挑戦。分野を担う若手中堅が育っている。

木野村研 陽電子分光・照射材料科学 電子線型加速器・RI線源の利用による照射、陽電子分光技術の開発を継続する。尚課題に関する福井炉への取り組みも継続。

谷口研 核ビーム物性学 オンライン同位体分離装置(ISOL)を利用した研究継続は困難。ウルトラファインパルスや準液滴などRIを使ったナノサイズの物性研究は、ライナックやRIプラットフォーム、市販の線源を活用して継続。KURAMA(Kyoto University RADIATION Mapping system)は今後も発展。

奥地研 結晶非晶質構造解析・宇宙地球物質科学 福井炉等の量子ビーム回折装置の研究開発、多様な特殊環境の導入、高温高压合成を結合。回折装置は所外線源利用、特殊環境実験は中性子以外の量子ビームでも実施。全てを継続できる。

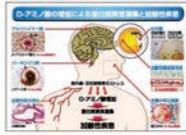
佐藤研(予定) 超重元素化学 R7年10月より、複合研のRI環境と購入する線源を組合せた研究環境の構築予定。超重元素という“尖った研究”に“尖った”学生を引き込むことを、学科や専攻(物質エネルギー化学)の側からも期待されている。

生命科学分野

2022年4月より3研究室は共同研究の促進のため量子ビーム生体高分子統合研究センター(QPID)を立ち上げた。その結果、年間一報程度ではあるがセンター内での共同研究による論文発表を行っており、より一層の生命科学の活性化を目指している。2023年10月よりフロンティアの2研究室もQPIDに参画したことにより、大講座制を意識した研究体制になりつつある。

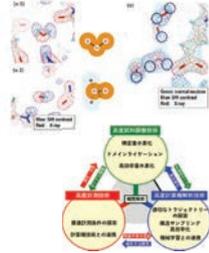
高田研 D-アミノ酸タンパク質・質量分析装置の応用利用

D-アミノ酸蛋白質と言う独自の観点からの生命科学を進めている。学生も継続的に配属されていて、人材育成も複合研の中では積極的に行っている。



茶竹研 タンパク質結晶構造解析

量子ビームによる独自のタンパク質結晶構造解析を進めている。特に中性子による水素一の解析も主眼に行っている。



杉山研 統合的手法による構造・動的生命科学

試料調製・測定手法開発・解析の統合的手法による生体高分子の精密構造・動的解析積極的に進めている。AMED/BINDSにも参画している。自動化導入等で論文Productivityの向上を図る。また、新試験研究炉プロジェクトでも先導的な役割を担っている

医学・生物学分野 ※各分野長の確認済(除天満研)

医学生物学分野ではサイクロトロンを活用し、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)に関する新規薬剤、放射線生物、物理工学に関連する加速器BNCT研究を推進していく。これら研究活動を通じて、サイクロトロンを用いたBNCTにおける共同利用・共同研究を進めるための基盤の構築し、さらなるBNCTの発展・展開を目指す。

鈴木研 粒子線腫瘍学 サイクロトロンを積極的に活用し、BNCTの適応疾患拡大のために必要な基礎研究、BNCTによる正常組織影響研究、BNCT後の再発メカニズムの解析、伴侶動物を含む中型動物のBNCTに対する適応拡大に向けた基礎研究を行う。また、ホウ素薬剤の分布・取り込み評価を網羅的に行う体制を構築し、サイクロトロンによる共同利用での効率的かつ実用的なホウ素薬剤開発研究が進められる環境をつくる。

田中研 粒子線医学物理学 医療に用いられる新規放射線照射場の構築と、先端放射線検出技術によるBNCTの品質保証手法の開発を行っている。これらの研究分野を統合的に推進することで加速器BNCTのさらなる発展を目指す。サイクロトロンを用いた中性子源の高度化を通じて、重水中性子照射設備の代替中性子源としての整備をすすめる。

天満研 粒子線生物学 遺伝子欠損/過剰発現細胞、レポーター導入細胞などを活用して、BNCTの効果にどのような分子メカニズムが関わっているかということについて研究している。ホウ素薬剤の取り込み能や細胞生存に関わる細胞メカニズムを明らかにし、加速器BNCTの研究の応用、発展へとつなげる。

環境理工学・放射化学分野

原子力施設や原子爆弾等で放出される放射性物質やその他の有害物質による環境中の影響評価、負荷軽減、防災システムの合理化などに関する研究を進めている。

放射性物質を中心に有害物質の環境中での移行、形態変化などの挙動を解明するために研究所の照射施設やホットラボの設備を用いて元素分析、放射能測定、微粒子分析などを行っている。最近の例だと広島への原爆投下による放射性降下物の拡散状況に関する調査のため、広島県の土壌試料に関して原爆の爆発に由来する放射性物質、火災煙に由来する微粒子状炭素、衝撃塵などに由来すると考えられる溶融微粒子、微量元素などの分析を進めている。

藤川研、高宮研、福谷研の3分野ともに研究所の安全管理を担当しながら、共同利用研究受入、工学/農学の学生受入は定常的に行っている。

原子力工学・放射線・量子線分野

原子力施設や原子爆弾等で放出される放射性物質やその他の有害物質による環境中の影響評価、負荷軽減、防災システムの合理化などに関する研究を進めている。

- ・ KUCA低濃縮化（世界初のUMo核燃料）による研究推進
- ・ 次世代原子炉や核変換に向けた炉物理、核データ研究
- ・ 放射線廃棄物・核医薬に対応したアクチノイド基礎・応用研究
- ・ 核燃料・原子力材料の基礎物性研究（マテリアルズ・インフォマティクス含）
- ・ 液体金属ループによる原子力熱流動研究
- ・ 低速中性子ビーム輸送・制御に関する研究・利用装置開発
- KUR共同利用等を活かした「もんじゅ」サイト新試験研究炉へ向けた展開など

まずKURを安全に使い切ると共に、廃止措置の着実な実施と知見をはじめ、JRR-3等関連機関とも連携し、新試験研究炉等に向けた学術利用を先導する。KUCA, LINAC, HLの特徴を最大限に生かし、複合研ならではの原子力研究の可視化、人材育成の拠点形成を目指す。



MKB:分析Phaseは終了⇒計画Phaseへ



新たな複合研を構築しましょう!

We will make KURNS better

真のMKBは
We have Made KURNS Best!

ご清聴ありがとうございました

3. 第二部／活躍するフロンティア研究者

フロンティア研究プロジェクトでの研究進展

(京大複合研) 奥田 綾

フロンティア研究プロジェクトでの 研究進展

京都大学複合原子力科学研究所
複合原子力科学フロンティア研究プロジェクト
生体分子機能設計学研究分野
奥田 綾

令和6年度 京都大学複合原子力科学研究所 将来計画短期研究会

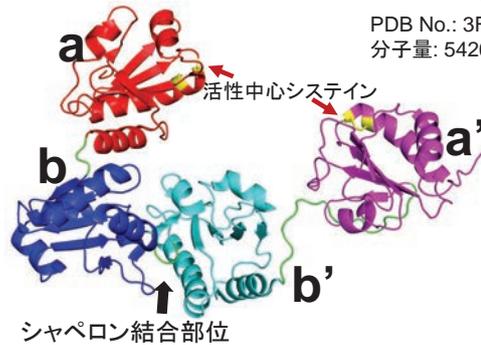
目次

- はじめに
 - 酸化了的フォールディング酵素ER-60
 - 中性子散乱測定による構造研究
 - 区分重水素化試料の調製
- タンパク質の重水素化技術
- タンパク質のライゲーション技術
- 中性子散乱測定による構造研究
- まとめ及び今後の展望

はじめに

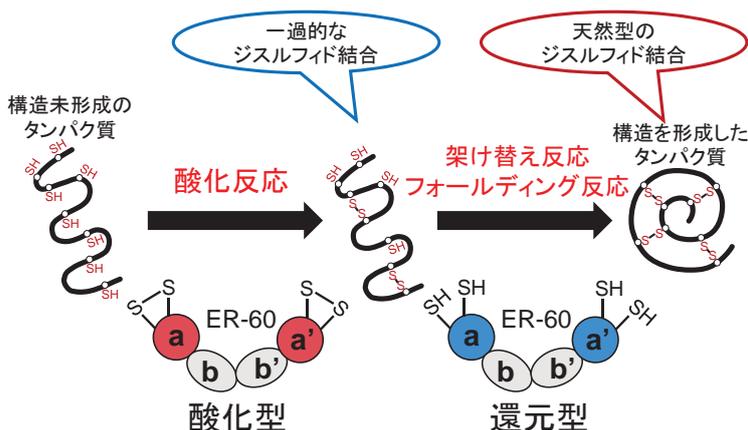
ヒト酸化了的フォールディング酵素ER-60

PDB No.: 3F8U
分子量: 54265 Da

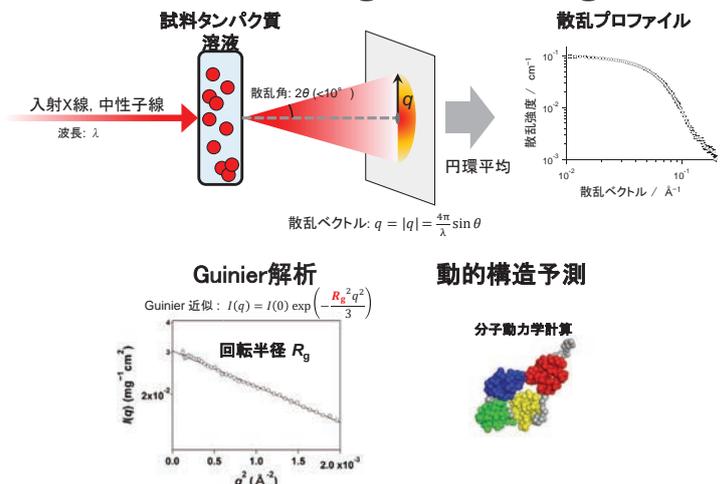


1. ジスルフィド結合の形成を伴うタンパク質の構造形成を担う酵素
 2. 神経変性疾患の原因となるアミロイドβの線維化阻害効果を持つ
 3. 神経軸索再生の応答因子である
- 創薬ターゲットとして注目されている

ER-60による酸化了的フォールディング反応



小角散乱 (Small Angle Scattering: SAS)



ER-60のX線小角散乱(SAXS)測定

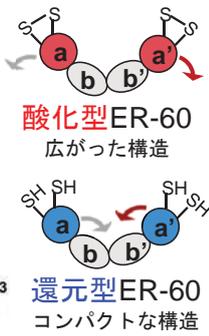
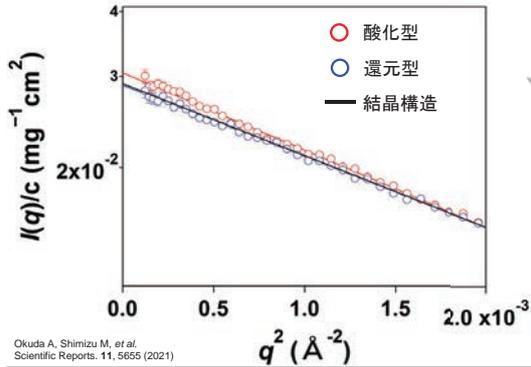
Guinier 近似: $I(q) = I(0) \exp\left(-\frac{R_g^2 q^2}{3}\right)$

傾きが R_g に対応

酸化型 $R_g: 32.1 \pm 0.2 \text{ \AA}$

還元型 $R_g: 30.8 \pm 0.2 \text{ \AA}$

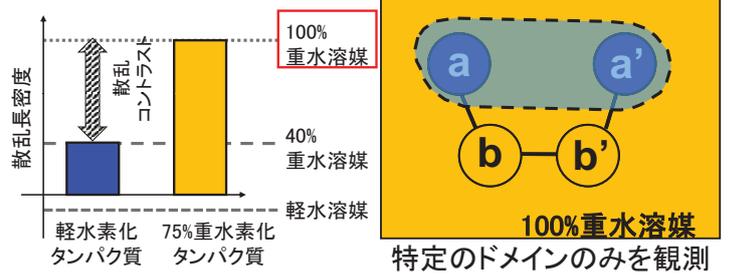
結晶構造 $R_g: 31.0 \text{ \AA}$



Okuda A, Shimizu M, et al. Scientific Reports. 11, 5655 (2021)

コントラスト同調中性子小角散乱(iCM-SANS)法

$$I(q) = \left| \int_V [\rho(r)_{\text{solute}} - \rho_{\text{solvent}}] \exp(iq \cdot r) dv \right|^2$$



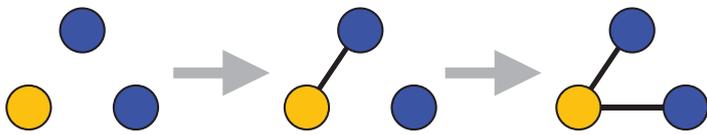
区分重水素化試料の作製には
軽水素化タンパク質/重水素化タンパク質を別々に作製し
繋ぎ合わせる(ライゲーション)技術が必要

区分重水素化試料作製に必要な技術

1. 重水素化/軽水素化タンパク質(ドメイン)を作る



2. ドメインを繋げる (ライゲーション)



区分重水素化試料作製に必要な技術

1. 重水素化/軽水素化タンパク質(ドメイン)を作る

- ・重水素化タンパク質の作製と重水素化率の制御
- ・大量のタンパク質
- ・高コスト (重水/重水素化物)

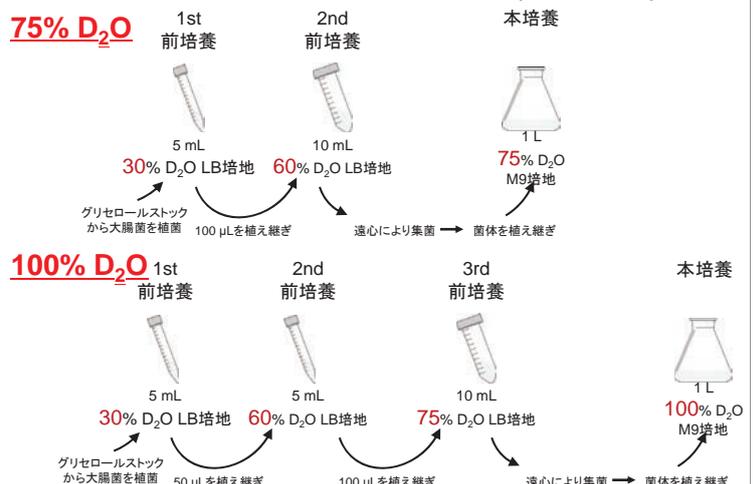
2. ドメインを繋げる (ライゲーション)

- ・アミノ酸同士のペプチド結合反応が進行しにくい
- ・複数の大きなドメインを繋げる技術が確立していない

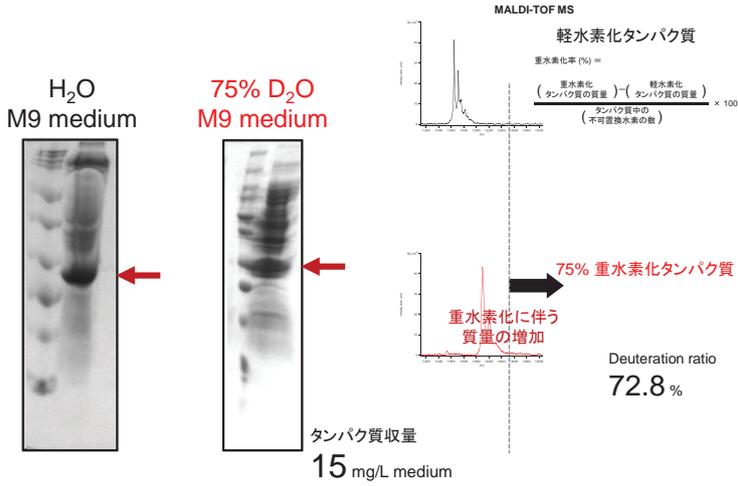


タンパク質の重水素化技術

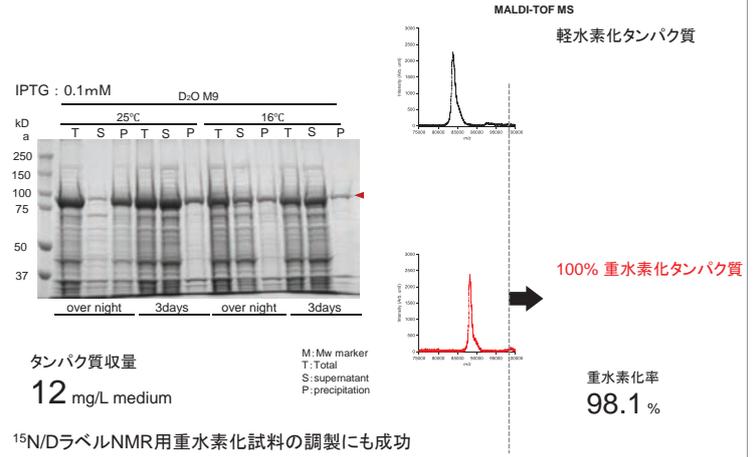
重水素化タンパク質の作製 (大腸菌)



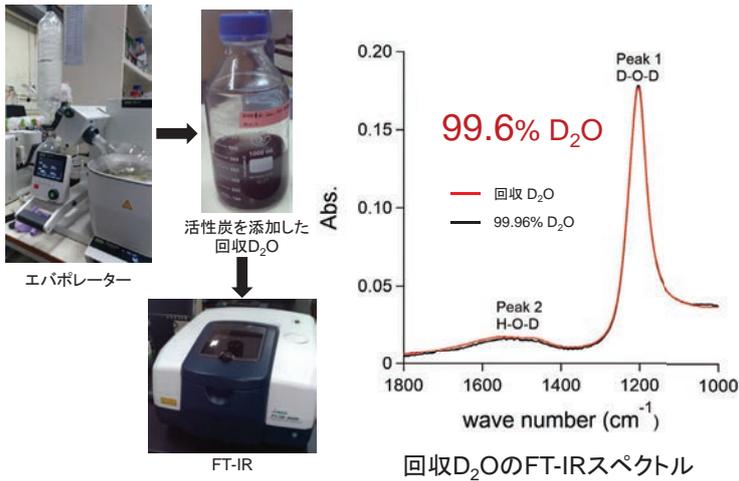
75% 重水素化タンパク質の作製



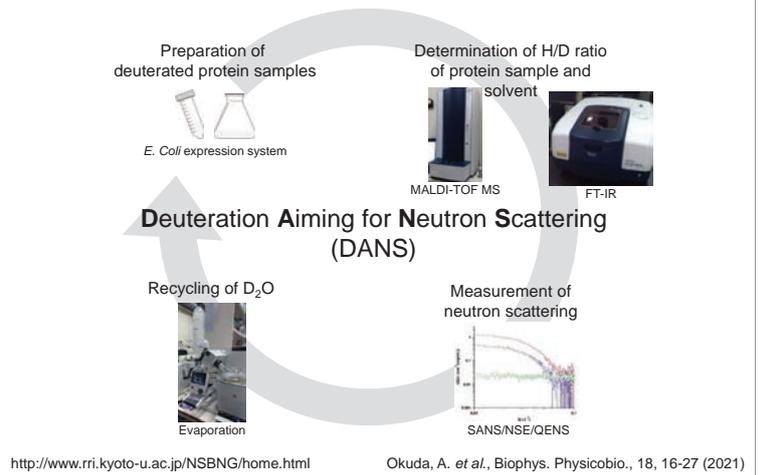
100% 重水素化タンパク質の作製



重水の再利用



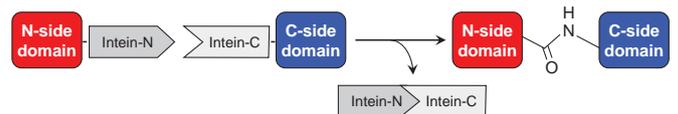
中性子散乱測定を目指した重水素化技術



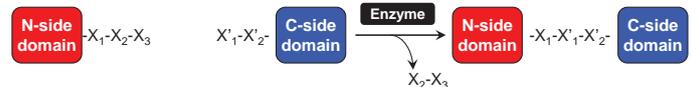
タンパク質のライゲーション技術

タンパク質のライゲーション法

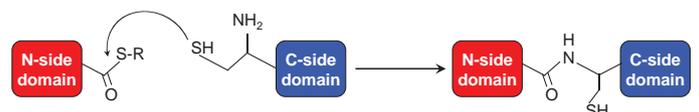
1. タンパク質トランススプライシング



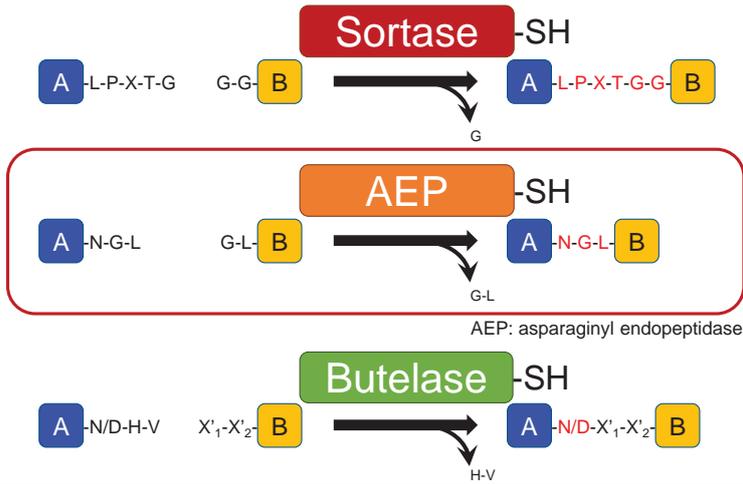
2. 酵素反応によるライゲーション



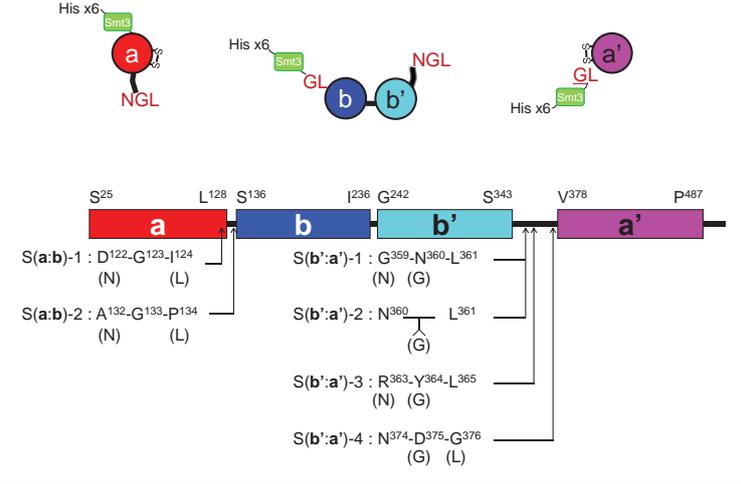
3. 化学ライゲーション



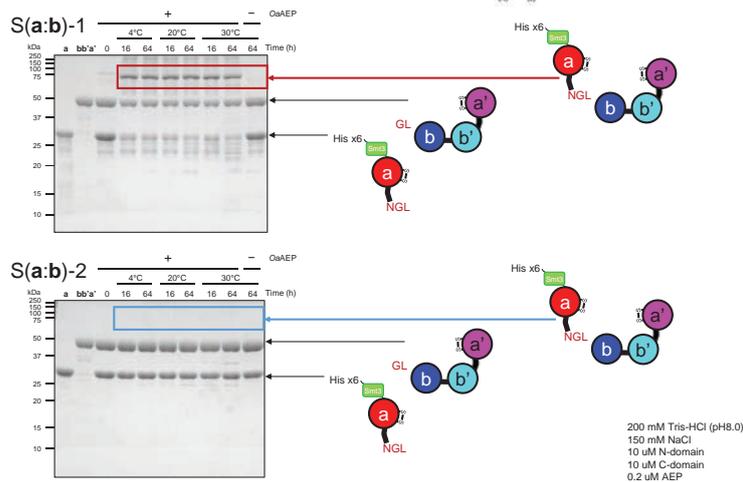
ライゲーション酵素



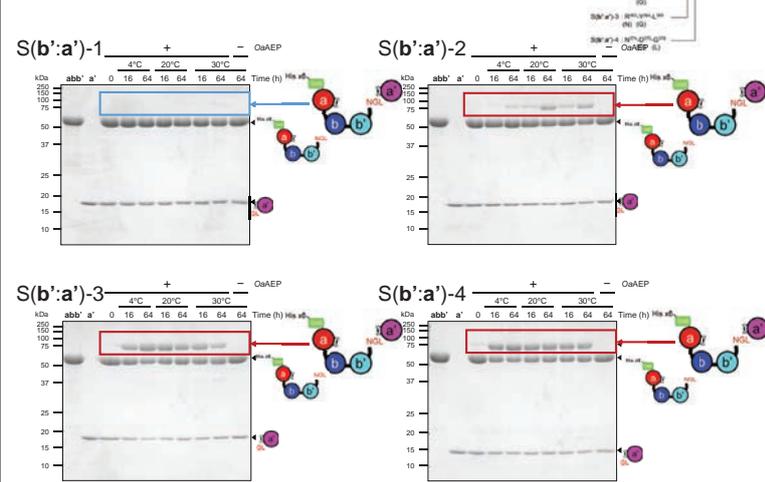
ライゲーションサイトの検討



aとbb'aのライゲーション反応

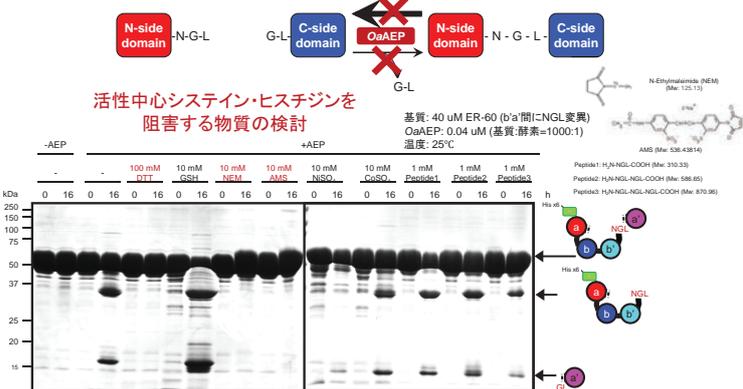


abb'aとaのライゲーション反応



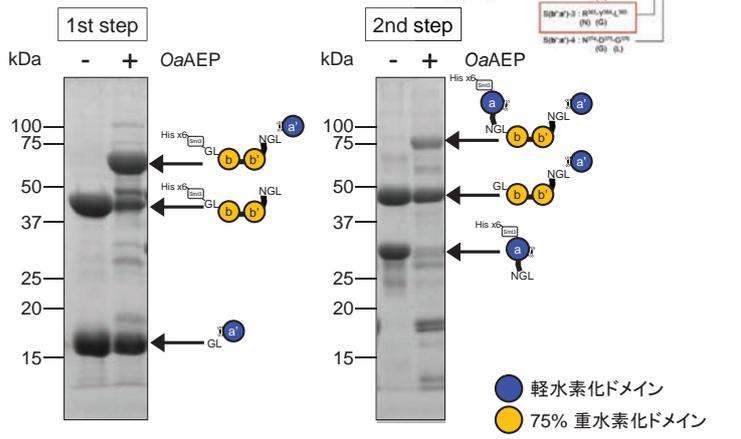
酵素を用いて調製したライゲーション産物を実験に利用するにあたっての課題

ライゲーション酵素が微量に残存していた場合の
酵素の逆反応によるライゲーション産物の分解

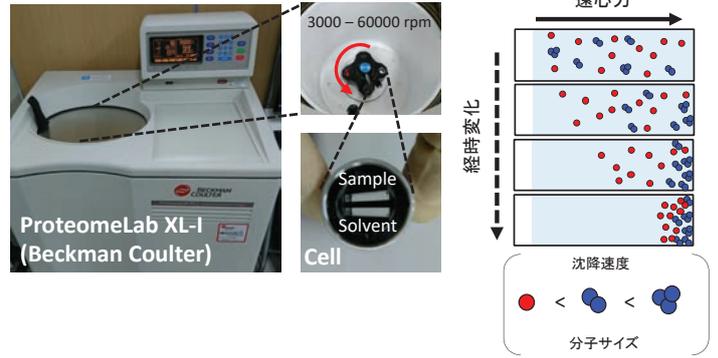


中性子散乱測定による 構造研究

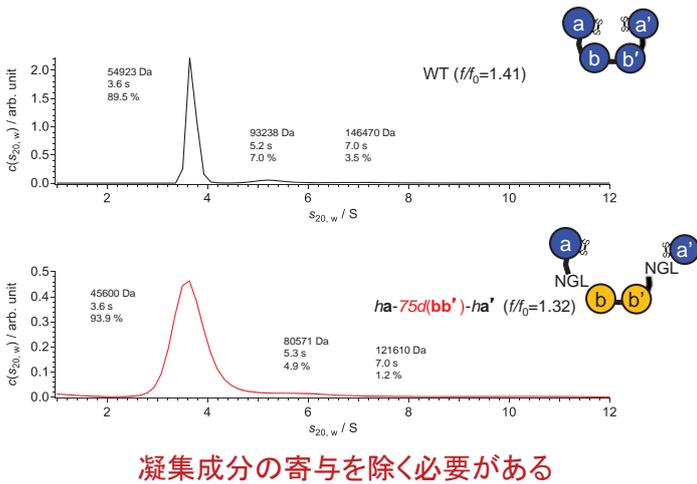
重水素化/軽水素化ドメインの 2ステップライゲーション ER-60



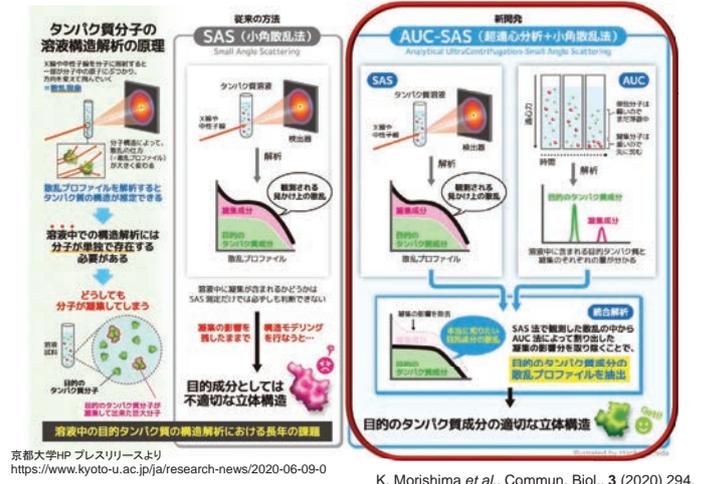
超遠心分析 (Analytical UltraCentrifugation: AUC)



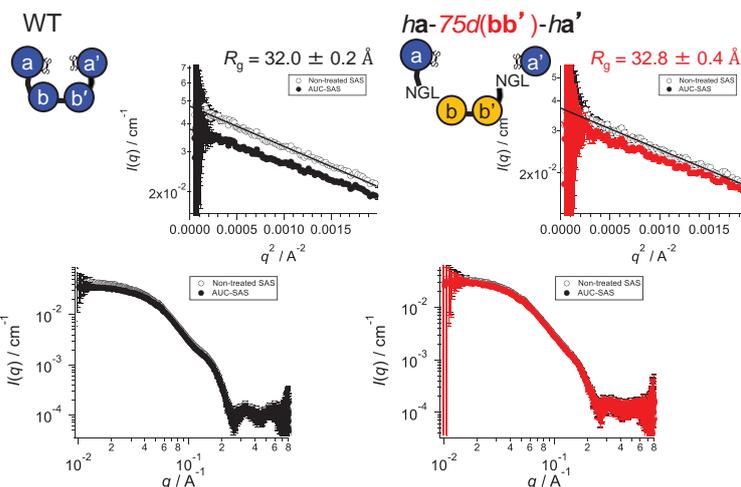
ライゲーション試料のAUC測定



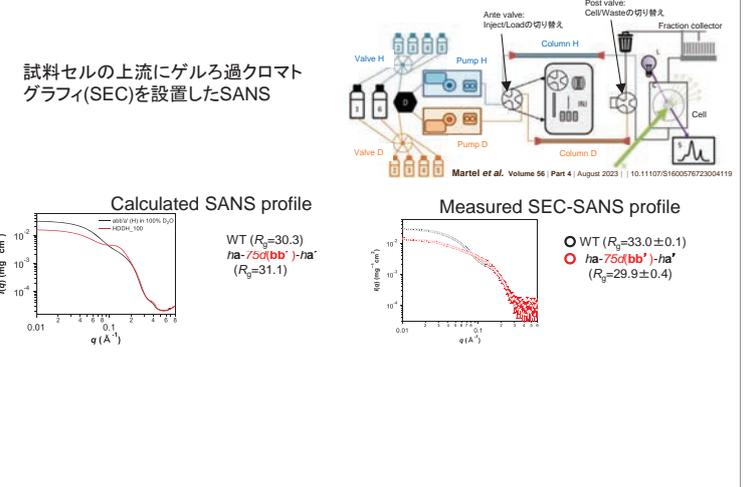
AUC-SASによる凝集の影響の除去



ライゲーション試料のSAXS測定



区分重水素化試料のSEC-SANS測定@ILL



まとめ

- **タンパク質の重水素化技術**
 - 100%および75%重水素化タンパク質の調製に成功
 - 重水再利用によるコストダウン
- **タンパク質のライゲーション技術**
 - 酵素を利用したライゲーションに成功
 - ライゲーションサイト選択の重要性
 - 逆反応を阻害する分子の特定
- **中性子散乱測定による構造研究**
 - 酵素を用いた多段階ライゲーションにより区分重水素化試料の調製に成功
 - SEC-SANS測定

今後の展望

- ER-60の構造解析 (SEC-SANSデータの解析)
→酸化的フォールディングの分子機構の解明に迫る
- タンパク質ライゲーション技術の一般化と技術開発
- 生命科学分野での中性子利用の展開

複合研を拠点とする 中性子を利用した生命科学研究

- 重水素化タンパク質の供給拠点
 - タンパク質ライゲーション技術を用いた区分同位体試料の供給拠点
 - オリジナリティある試料を用いた中性子を利用した構造生物学・生命科学研究の展開
- 重水素化研究室・中性子施設との連携
→新試験研究炉での生命科学研究



謝辞

粒子線基礎物性研究部門 粒子線物性学研究分野の皆様

杉山 正明 先生、裏出 令子先生、井上 倫太郎 先生、守島 健 先生、清水 将裕 先生

量子ビーム生体高分子統合研究センターの皆様

茶竹 俊行 先生、高田 匠 先生、慈幸 千真理 先生

佐藤 衛 先生 (横浜市立大学)

小田 隆 先生 (立教大学)

加藤 晃一 先生・矢木真穂 先生 (生命創成探究センター/分子科学研究所/名古屋市立大学)

齋尾智英 先生 (徳島大学)

笠口友隆 先生 (慶應義塾大学)

川北至信 様・高田慎一 様 (J-PARC/MLF)

中川 洋 様 (JAEA)

富永大輝 様 (GROSS)

日野正裕 先生 (京都大学)

養王田 正文 先生 (東京農工大学)

今西 未来 先生 (京都大学)

研究助成

科研費

日本科学協会

小柳財団

不二たん白質研究振興財団

京大複合研

JST

AMED

基盤研究(S)/若手研究

笹川科学研究助成

研究助成

若手研究助成

所内研究助成

ACT-X

BINDS

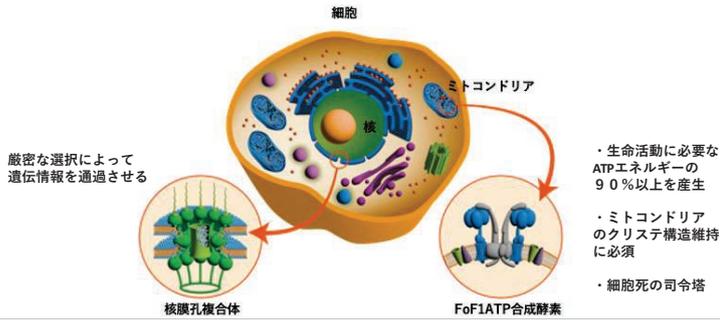
4. 第二部／活躍するフロンティア研究者

フロンティア研究プロジェクトでの研究進展

(京大複合研) 慈幸 千真理

研究目標

細胞から細胞小器官を単離し、働く巨大膜タンパク質複合体を生体膜から可溶化し機能する完全複合体構造を**高分解能**で決めること

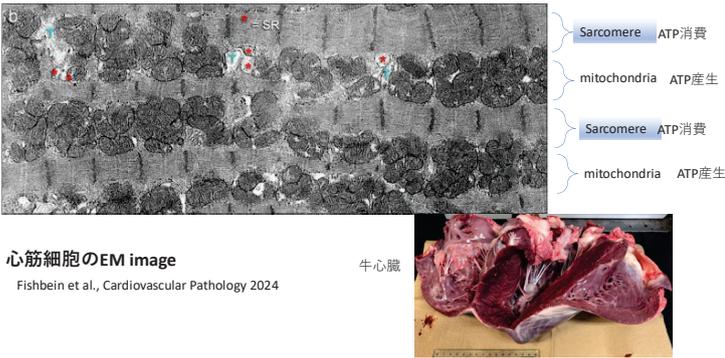


2025.2.14
将来計画短期研究会

巨大膜タンパク質複合体・高分解能構造解析への取り組みと近い将来像

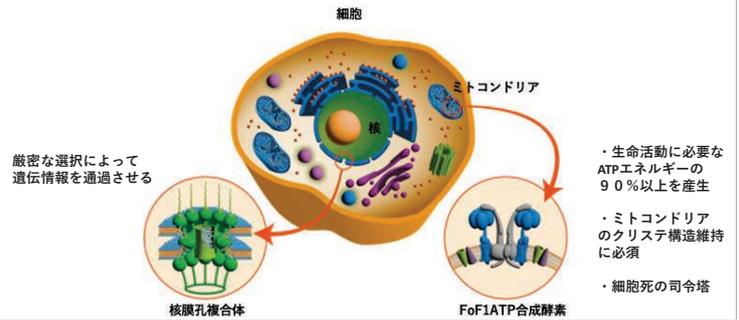
複合原子力科学フロンティア研究プロジェクト
生体エネルギー変換 研究分野
慈幸 千真理

①どの細胞からミトコンドリアを単離する？



研究目標

細胞から細胞小器官を単離し、働く巨大膜タンパク質複合体を生体膜から可溶化し機能する完全複合体構造を**高分解能**で決めること



研究目標を達成するために

- ① どの細胞から、細胞小器官（ミトコンドリア、核）を単離する？
- ② 何を使って生体膜から可溶化する？ 界面活性剤、ナノディスク等
- ③ 精製方法の確立 アフィニティカラム or 遠心分離 etc...
- ④ 構造解析の手法（クライオ電子顕微鏡、X線（中性子）結晶、溶液散乱、NMRetc...）

ATP合成酵素や核膜孔複合体などの巨大膜タンパク質複合体は生体膜から可溶化後、非常に不安定

構造解析のためには、試料調製が肝となる

研究目標を達成するために

- ① どの細胞から、細胞小器官（ミトコンドリア、核）を単離する？
- ② 何を使って生体膜から可溶化する？ 界面活性剤、ナノディスク等
- ③ 精製方法の確立 カラム or 遠心分離 etc...
- ④ 構造解析の手法（クライオ電子顕微鏡、X線（中性子）結晶、溶液散乱、NMRetc...）

ATP合成酵素や核膜孔複合体などの巨大膜タンパク質複合体は生体膜から可溶化後、非常に不安定

構造解析のためには、試料調製が肝となる

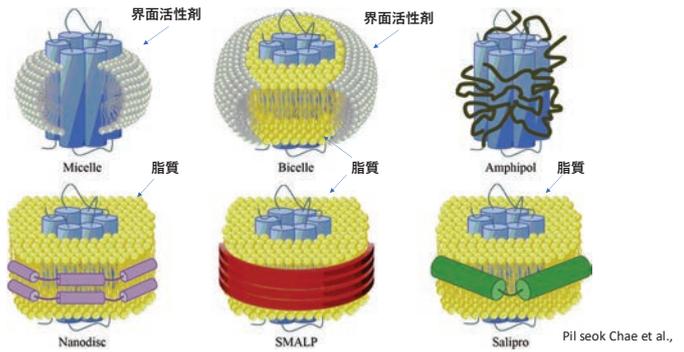
研究目標を達成するために

- ① どの細胞から、細胞小器官（ミトコンドリア、核）を単離する？
- ② 何を使って生体膜から可溶化する？ 界面活性剤、ナノディスク等
- ③ 精製方法の確立 カラム or 遠心分離 etc...
- ④ 構造解析の手法（クライオ電子顕微鏡、X線（中性子）結晶、溶液散乱、NMRetc...）

ATP合成酵素や核膜孔複合体などの巨大膜タンパク質複合体は生体膜から可溶化後、非常に不安定

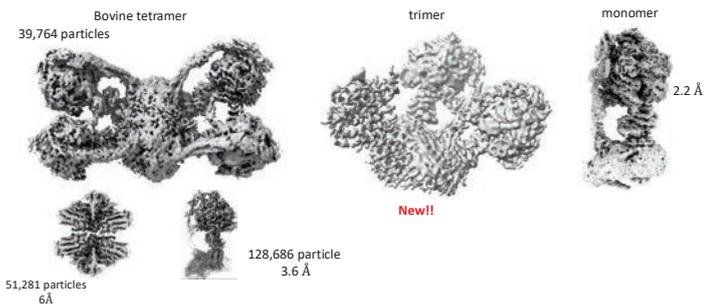
構造解析のためには、試料調製が肝となる

②何を使って生体膜から可溶化する？



まずは。。。クライオ電顕を用いた単粒子構造解析

京都産業大学 横山謙研究室 中野敦樹さん（当時D1）
@大阪大学 超高压電子顕微鏡センター 光岡研究室

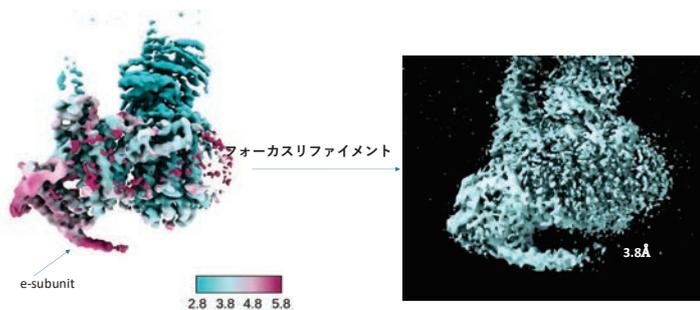


研究目標を達成するために

- ① どの細胞から、細胞小器官（ミトコンドリア、核）を単離する？
- ② 何を使って生体膜から可溶化する？ 界面活性剤、ナノディスク等
- ③ 精製方法の確立 カラム or 遠心分離 etc...
- ④ 構造解析の手法（クライオ電子顕微鏡、X線（中性子）結晶、溶液散乱、NMRetc...）

ATP合成酵素や核膜孔複合体などの巨大膜タンパク質複合体は生体膜から可溶化後、非常に不安定

構造解析のためには、試料調製が肝となる

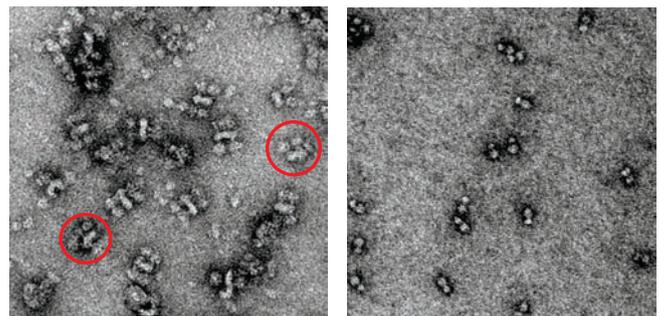


クライオ構造解析の結果、膜結合ドメイン（リング以外）の分解能は低く、先に挙げた研究目標には到達していないが、**Trimer構造があったことにより**、新しくわかったことを論文にまとめている。

牛心筋ミトコンドリアからATP合成酵素を調製

試料① tetramer と trimer

試料② monomer



10mg~

ATP synthaseの高次集合体の解釈

ATPSynthase pentamer ATPSynthase hexamer

2,3,5対称を持つのはウイルスと同じ高次集合体を形成する？

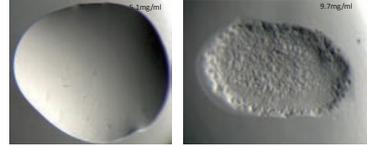
ヘキサマー、ペンタマーの構造解析が必要

PDBより

高分解能構造解析に向けての取り組み

1. X線結晶構造解析 **動いているものを意図的に止める**
ある特定の安定状態を固定化できる結晶化
結晶化がセレクションになる。
中性子結晶構造解析によるプロトンの可視化
ショ糖を除去する必要がない。

ATPSynthaseの針状結晶



針状結晶は得られているので今後、結晶を大きくする必要あり。

②何を使って生体膜から可溶化する？

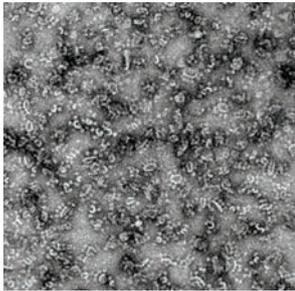
これまでは、DM(デシルマルトシド)で可溶化していた。。

GDNという界面活性剤で可溶化

より膜内に近い状態で可溶化することができる

※GDNは、15万/g 一回の調製で5g使用

Hexamer, pentamerの収量が増やすことができた！！

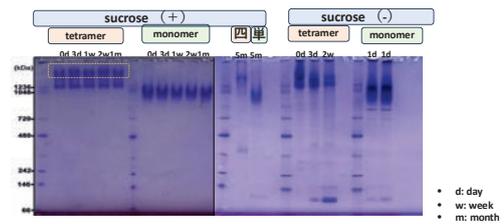


クライオ電顕構造解析
溶液状態で解析

生体内で存在することを証明できる。

高分解能構造解析に向けての取り組み

精製試料の安定性



2. 精製したATPSynthaseは、精製過程で用いたショ糖を除去することで不安定
ショ糖が含まれたままの試料をクライオ電顕構造解析をされている先生(筑波大 谷一寿教授)と共同研究を開始 (BINDS) 2024.12.27から

研究体制 (ミトコンドリアFo F1ATP合成酵素)



高次集合体構造解析に向けての取り組み

Tetramerがoligomerの機能する最小基本単位と考えていたが、hexamer, pentamerが、ネガティブ染色で観察

巨大膜タンパク質複合体の調製拠点としての未来

精製&試料の評価を複合研で行う

各ステップの確認

- ・ **生物化学的検証** (クリアネイティブ電気泳動、SDS電気泳動、ウエスタンブロッティング、活性測定)

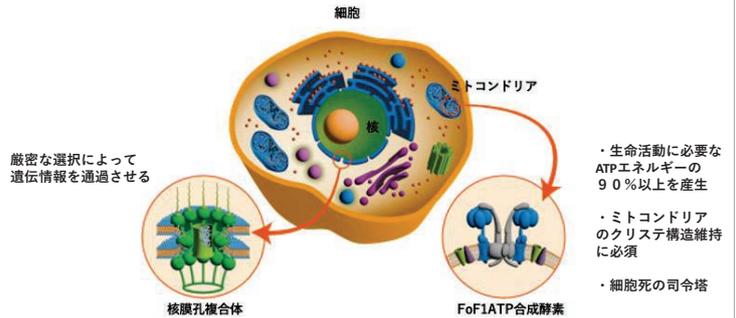
→ 研究室で行う

- ・ **生物物理化学的検証** (動的散乱乱法、質量分析、試料のネガティブ染色による透過型電子顕微鏡観察)

→ 研究所で行う

研究目標

細胞から細胞小器官を単離し、働く巨大膜タンパク質複合体を生体膜から可溶化し機能する完全複合体構造を**高分解能**で決めること



生物物理化学的検証のために必要な透過型電子顕微鏡 (TEM)



透過型電子顕微鏡 (TEM)は、ライフサイエンスへとマテリアル・半導体へと使用できる

生体試料を**ネガティブ染色**によって透過型電子顕微鏡で観察

コントラストを上げることができる。

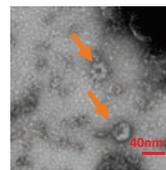
染色液として、酢酸ウランやモリブデンなどの重金属があるが、酢酸ウランでの染色が一番良い

透過型電子顕微鏡
日本電子JEOL HPより

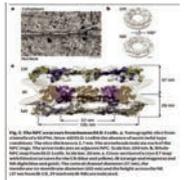
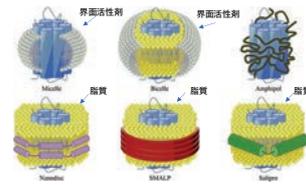
②何を使って生体膜から可溶化する？

界面活性剤で可溶化できないことが実験で分かった。

ナノディスク (SMA)



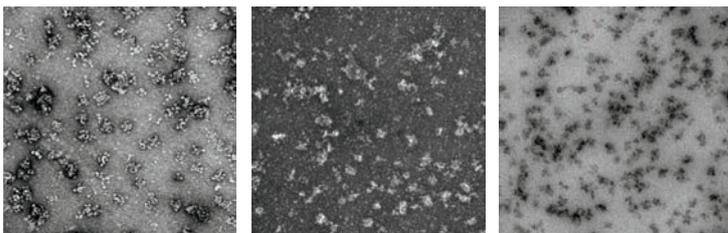
可溶化できた！



問題点

収量が少ない。
そのため、現時点では精製方法を確立できない。

核燃料物質 (酢酸ウラン) の利点と欠点

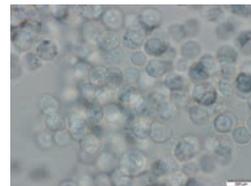


酢酸ウラン モリブデンアンモニウム リンタングステン
モリブデンアンモニウムでも染色可能であるが、膜蛋白質の染色は不向き

**現状：酢酸ウランは核燃料物質のため限られた施設でのみ使用可能
核燃ゴミは永久保管のため、酢酸ウランの使用を制限されつつある。**

①どの細胞から核を単離する？

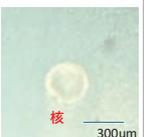
構造解析には大量の核膜孔複合体が必要



HEK細胞の核
3000個の核膜孔複合体/核



アフリカツメガエルの卵母細胞の核
5X10⁷個の核膜孔複合体/核



課題：精製方法を確立する。

複合研の強み

核燃料物質を使った
試料評価



貴重な技術

巨大膜タンパク質完全複合体
の精製



成果創出

構造解析

X線・中性子構造解析
クライオ電子顕微鏡解析
中性子溶液散乱
NMR 等

創薬研究

第二部 活躍する若手研究者 質疑応答

4. 巨大膜タンパク質複合体・高分解能構造解析への取り組みと近い将来像 慈幸千真理

三澤： 慈幸先生ありがとうございました。ご質問などいかがでしょうか？

黒崎： 慈幸先生ありがとうございました。非常に精力的に色々ご研究されていることが良く分かりました。今回フロンティア研究プロジェクトということで、若手の先生が自由に独立して研究するという基本の考えにおいてお仕事をしています。何か思うことがあればお考えを聞かせていただけますか？例えば、研究スペースの話であったり、実際に独立して研究が出ているのかなど、今の率直なお考えをお願いします。

慈幸： 私自身が独立して、自分が考えるテーマを自由に研究させて頂いているのは非情に感謝していますが、現状は一人で動いていますので、一緒に研究できる環境を整えるのが急務で、もう少し研究を加速させて成果を出し、予算を沢山取っていかないといけないと考えます。研究するにあたって、複合研にない透過型電子顕微鏡、4千万程するのですが、これを購入するだけの成果をまだ出せていないというのが問題点と認識しています。成果が生まれましたら、顕微鏡を購入し、もう少し効率よく複合研で精製したり、試料評価をするための整備が出来れば良いと思いますが、私一人の力で透過型電子顕微鏡を購入するのは難しく維持も大変なので、鉱物研究をされている先生方と協力できれば、テーマは違いますが同じ機械を使えば色々な研究が進むのでは？と考えます。

黒崎： 状況が良く分かりました。所も上手くサポートできる場所はしたいと思います。杉山先生のご発表にありましたが、複合ではなく単に集合になっているのではないかとのお話もあります。我々でも横のつながりを上手く繋がれる仕掛けを作っていければと思いますので、引き続きよろしく願いいたします。

慈幸： ありがとうございました。

三澤： ありがとうございました。松田様お願いします。

松田： 近畿大学の松田外志朗です。大変面白い研究をご紹介頂きありがとうございます。今回2題続けてタンパク質の構造の話がありましたが、そういう研究をされる方にとって、放射線を扱う施設の利用価値についてお聞きしたいです。先程の酢酸ウランの使用は確かに使える所がそんなにないので、他のタンパク質を研究している人

も使い、そこで併せて電子顕微鏡を使うのであれば活性化もあるかと思いますが、
こういう施設で研究をする意義についてどうお考えでしょうか？

慈幸： 構造解析をするためには、試料調整が非常に重要になり、そのために核燃料物質を
使った試料評価がセットで付いてきます。複合研では核燃料物質を使った試料評価
ができることが強みなので、私としては複合研で研究できると一番良いと考えてい
ます。

松田： ありがとうございます。酢酸ウランは最近では使われなくなった。例えば大学とか
で湧き出しのように見つかることがあるのですが、そういった酢酸ウランを使って
電子顕微鏡で見たいというニーズは結構あり得るもののでしょうか？

慈幸： 専門の先生に先日問合せましたら、酢酸ウランは制限がかかってくるから「使いた
いけど使えない」ことが増えニーズが高まって来ると考えます。

松田： ありがとうございます。

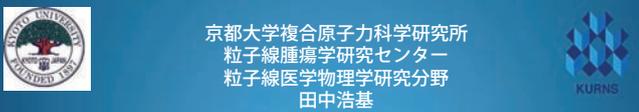
三澤： ありがとうございます。もし追加のご質問などありましたら、Google Form を活
用いただければと思います。ありがとうございます。

5. 第三部／KURに頼らない教育と研究、
複合研での展望

多彩な加速器を使った教育と研究

(京大複合研) 田中 浩基

多彩な加速器施設を使った教育と研究



京都大学複合原子力科学研究所
 粒子線腫瘍学研究センター
 粒子線医学物理学研究分野
 田中浩基

スライド提供 (京大複合研)
 高橋俊晴、木野村淳、鈴木実、渡邊翼

2025年2月14日 将来計画短期研究会

電子線ライナック

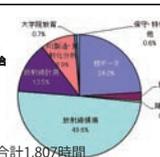
電子線ライナック

1965年(昭和40年)

電子線ライナック

- 電子線照射 材料照射
- X線照射 RI製造
- コヒーレント放射光 物性研究
- 鉛減速スペクトロメータ
- 中性子TOF
- 核燃料物質使用可能
- パルス中性子
 - 12mライン $\sim 10^{14}$ (n/cm²s)
 - 6kW出力時 $\sim 8 \times 10^{12}$ (n/s)
 - Taターゲット表面 $\sim 3 \times 10^{11}$ (n/cm²s)

ビームON時間の研究分野別の割合



2023年度 合計1,807時間

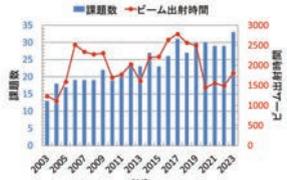
By courtesy of Prof. T. Takahashi

可変範囲が広い = 多様な目的に使える

- 低エネルギー (6MeV) ~ 高エネルギー (46MeV)
- 超微弱ビーム (<1pA) ~ 大電流 (>300μA)
- 多様な時間構造のバルスビーム

利用者数 (2023年度)

所属機関	年間使用延べ人数 (人・日)
所内・学内	642
国立大学	156
公立大学	109
私立大学	116
大学共同利用機関法人	9
独立行政法人等	71
民間機関	19
外国機関	0
計	1,122



※2020, 2021年度はコロナ禍の影響で運転休止や実験キャンセル
 ※2022年度はマイクロ波発生装置更新工事のため半年間運転休止

電子線ライナック

パルス中性子の利用

核データ測定研究

- 熱中性子捕獲断面積の高精度化
- TOF測定に用いるサンプル量の高精度決定技術開発
- 全断面測定を組み合わせた共鳴パラメータの決定

非破壊分析研究

- 新たな中性子源開発
- 核種定量技術の高精度化
- 可視化技術の高度化 (イメージング)
- 物性値評価方法の高度化 (形状・温度)

中性子検出器開発、放射性エアロゾル測定方法の研究

THz帯ミリ波帯コヒーレント放射光の利用

パッチ内電子数が多いほど増強度が高い

- 各種材料の吸収分光測定
- イメージング分光
- 光源開発 (円偏光分光システム、平面波CCR)
- 分光法開発 (テラヘルツ波電子線分光法)

Lバンドの優位性

低エネルギー電子ビーム源

制動放射X線の利用 (RI製造)、医療用RI

- メスパワー線源
- 研究所内にメスパワー一分光の研究拠点
- 短寿命のRIを製造し線源として供給
- (γ, n)反応による医療用RI

電子線の材料照射への利用

- 低エネルギー(~ 8 MeV)の利用
- 有意な放射化がなく照射試料をすぐに持ち出し可能
- mmオーダーの透過力
- 室温 \sim 高温(500度)までの試料温度精密制御
- 電気ヒーターによる照射前のプレヒート
- 照射中はパルス繰返し数による温度制御
- 水冷または強制空冷による冷却
- ヘリウム雰囲気中での照射 (酸化防止)
- 液体窒素温度での照射装置
- 超高線量率電子線照射

電子線を用いた新しい生物照射場について

FLASH-Radiotherapy (FLASH-RT)

超高線量率照射により高い抗腫瘍効果を維持しつつ、正常組織に対する障害を抑えられる現象

超高線量率照射 (FLASH-RT)

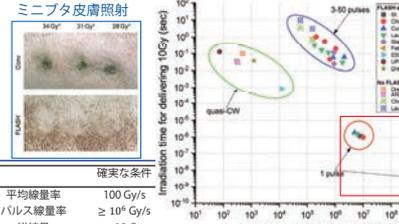
従来の放射線治療 (CONV-RT)

2014 マウス照射 LINAC(electron)

2016 ミニプタ照射 LINAC(electron)

2019 ヒト照射 ヒト非ランダム化試験 サイクロトロン(proton)

ミニプタ皮膚照射



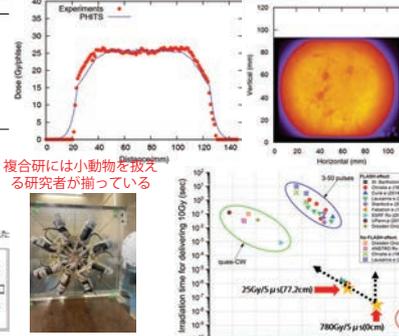
確実な条件

- 平均線量率 100 Gy/s
- パルス線量率 $\geq 10^8$ Gy/s
- 総線量 ≥ 10 Gy
- 10Gy到達時間 $< 10 \mu$ s

辻詢介、京都大学原子核工学専攻修士論文
 Reinhard Schulte et al. Appl.Sci. 2023;13,5021

電子線を用いた新しい生物照射場について

	SIT社 FLASH	KURNS-LINAC
電子エネルギー	5-12MeV	7-46MeV
パルス幅	0.2us-4us	2ns-5us
パルス間隔	1-350Hz	single-300Hz
電子銃最大電流	0.25A	10A
尖頭電流	-	6A
RF	3.1MW マグネトロン	13MW+20MW クライストロン



複合研には小動物を扱える研究者が揃っている

世界でトップクラスのFLASH照射場となりえる

辻詢介、京都大学原子核工学専攻修士論文

KURNS-LINAC使用の低速陽電子ビーム源（開発中）



B-1実験孔(低速陽電子ビームシステム)は2012年より開発を開始し、2020年頃に現在の形に→10課題程度の共同利用ユーザー数で推移(汎用の材料計測用ビーム装置として国内で独自位置)

KURIは2026年5月までに運転停止→KUR利用の低速陽電子ビームラインも同時に利用停止

このため以下を目指す

- (1)代替の陽電子ビーム源の開発
- (2)原子炉ベースの低速陽電子ビームでは不可能な特徴あるビーム源の開発

Publication (on construction)
Q. Xu et al. Journal of Phys.: Conf. Series 505 (2014) 012030
K. Sato et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B342 (2015) 104

現在は測定室を使ったビームラインの開発を進め、材料測定への応用を目指している



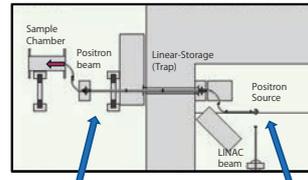
1990年頃に京大のグループが陽電子ビーム発生実験を実施(発生のみ)の試験的実験
強度： $4.4 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$ が得られた
(エネルギー：30 MeV /パルスレート：120 pps)
H. Tanaka et al. Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 4029

ライナック様平面図
(複合電子線型加速器ホームページより) By courtesy of Prof. A. Kinomura

KURNS-LINAC使用の低速陽電子ビーム源（開発中）

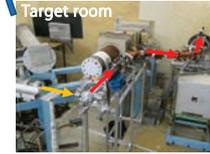
LINAC施設でのビームライン設置状況

ターゲット室から遮蔽壁を通じて測定室へ低速陽電子ビームラインを設置済



- 試運転実施、以下を確認
- 陽電子蓄積
 - 終端部までの陽電子輸送
 - 寿命測定系の動作

- PHITS計算を実施
- 30MeV, 30ppsで約 $6 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$ の強度が期待される
 - パルスレート増加、線源部改良で強度向上を期待

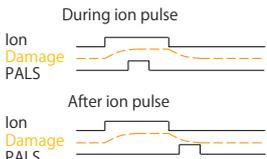


→ 電子
→ 陽電子

KURNS-LINAC使用の低速陽電子ビーム源（開発中）

パルス陽電子源の特徴を生かした応用

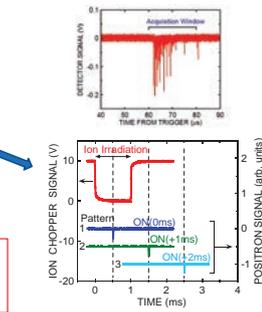
LINACからのパルス陽電子ビームを使うには、検出器の飽和を防ぐため、従来は準直化が必須であったが、パルスのまま測定する技術を開発



例：イオン照射に同期して測定時期を制御可能（照射中、減衰過程、照射後を選択）

陽電子線源部の時間構造：
原子炉 → 連続ビーム
LINAC → パルスビーム

パルスの特徴を生かしたポンブローブ型測定への応用を目指す



A. Kinomura et al., Rev. Sci. Instrum. 85 (2014) 123110.

京都大学複合原子力科学研究所

ロードマップ

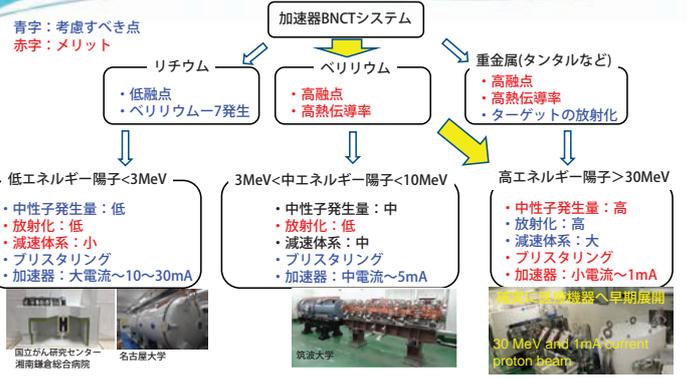
#多様な量子ビームの利用研究

主要施設/学	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
サイクロトロン加速器	利用運転 (2020年)															
BNCT用																
電子線リニアック																

- ・可変範囲が広い = 多様な目的に使える
- ・古い装置であるが新しい研究領域への応用が期待できる。研究テーマを探索・強化することも重要。
- ・次期気象衛星むすびまわりに搭載予定の電子線検出器の開発など放射線検出器の開発に関する課題が3件あるほか、Co-60から移行した利用者によるデバイスの耐放射線性の研究課題もある。
- ・2024年度の新規利用者による共同利用課題が3課題、2025年度も3課題あり、電子ライナックのニーズは高い状態を保っている。

サイクロトロン

加速器BNCTシステムの特徴



Cyclotron-Based Epithelial Neutron Source : C-BENS

サイクロトロン(30MeV・1mA陽子ビーム)とベリリウムターゲットによる
加速器BNCTシステム (Cyclotron-Based Epithelial Neutron Source : C-BENS)

- ・プリスタリングの克服
- ・照射後に鉛遮蔽を設置し放射化による被ばく軽減
- ・鉛・鉄・アルミ・フッ化物によるモテレーターの実現
- ・医療機器として承認された世界で唯一の加速器BNCTシステム→2つの医療機関で保健適応

照射室

サイクロトロン加速器 マグネット
カーボンストッパー

サイクロトロン

垂直入射イオン源
水素負イオン加速 30 MeV 1mA
RF frequency 73MHz
Average magnetic field 1.2T

加速器BNCTシステム

他施設連携

国際競争力を強化

「中性子特性評価ガイドライン作成」、
「BNCT用中性子照射装置のIEC規格策定」

KUR重水照射設備・C-BENSの現状と今後

重水照射設備 共同利用研究

BNCT用新規薬剤開発のための細胞・マウス照射: 2024年度 (全264課題) 中 55課題

2026年以降 KURは運転停止

1MW(火曜11:00~17:00)6時間
1MW(水曜8:00~17:00)9時間=15時間

原著論文2020年35報
2021年24報
2022年21報
2023年34報

粒子線医学研究センターHP

動物照射設備

新規薬剤開発のための小動物・細胞照射
BNCTのQA開発、検出器開発、BNCT用標準場
設定、非照射設備、運転時刻の制限

伴侶動物に対するBNCT適応拡大に向けた基礎研究

大阪公立大獣医臨床センター

腫瘍の診断、CT撮影

京都複合研

医療機器 医薬品

・BNCT実施、照射後管理

By courtesy of Prof. M. Suzuki

獣医BNCTをすすめるための問題点(放射化)

- ・一般公衆、医療従事者の被ばく、汚染物の取り扱い

下限数量に対する割合の経時的変化

退出基準の評価方法退出時点の放射能又は放射能濃度が獣医療法及びRI法の下限数量及び温度を十分に下回る時間を設定

獣医学PET核種下限数量を下回る時間+1半減期(端数切り上げ)として退出基準を設定している

→規制当局への働きかけのためのデータ

和田悠佑、高田卓志、鈴木実(京大複合研)

先端放射線計測技術を用いたQAQC手法

QA照射・照射

Watanabe, K., Yoshizashi, S. et al. Applied Radiation and Isotopes 248 (2022) 109553

コロメータ出口
Microdosimetry

Hsu, N., Tanaka, H., Takita, T. et al. Applied Radiation and Isotopes (2024) 161:120148

ビームモニタ

Takada, M., Yagi, N., et al. Medical Physics (2024) in press

治療が保険適応になった後に研究することは何か？

- 1) 現在のホウ素薬剤をよりうまく使おうとする研究
 - ・ BNCT後に副作用が起こる。正常組織への副作用を減らすには？
 - ・ BNCT後に癌が治らず、再発する患者がいる。BNCT抵抗性機序は？
- 2) 現在のホウ素薬剤の適応癌種を増やそうとする研究
 - ・ 現在、頭頸部癌・皮膚癌など一部の癌のみに保険適応
 - 乳がん・肺癌などの多い疾患や、肝癌などの難治性疾患に使うには？
- 3) 新たなホウ素薬剤を開発しようとする研究
 - ・ BNCTに利用できる、より有用なホウ素薬剤を模索する
 - (ナノ粒子、核酸誘導体、糖誘導体、抗体、薬酸受容体のリガンド etc.)

ICP(誘導結合プラズマ) 医療棟

次世代シーケンサー
バイオインフォマティクス

照射実験

By courtesy of Prof. T. Watanabe

第三部 KUR に頼らない教育と研究、複合研での展望 質疑応答

5. 多彩な加速器施設を使った教育と研究 田中 浩基

杉山： ありがとうございます。何かご質問いかがでしょうか？

中島： 研究中心ということで、教育の話があまりなかったと思います。それから、サイクロの TS-1 のバージョンアップに関してですが、今後どのようなバリアがあり、どのような工夫が必要かなど見通しを含めてお話をお願いしますか？

田中： 今の装置は、人に対する照射用に設計されていますので、熱外中性子は 10 の 9 乗出ます。それをマウスに直接当てると、減速しないため非常に効率の悪い照射になります。減速してもおそらく 5×10 の 8 乗位しか熱中性子を当てられません。KUR の重水設備では 10 の 9 乗位当てることができていますので、強度をあげることが 1 つの課題になっています。陽子の電流を、2 倍位に上げられるような研究を行いつつ、中性子が発生した後の効率を高めることで、なるべく重水設備での照射と同等位の強度に上げる必要があるかと考えています。性能的にマウス細胞照射にはあまり適していない装置なので工夫が必要と考えています。

中島： ありがとうございます。ユニットをつくられるということで検討が進むことを期待しています。

杉山： この話は、正に複合原子力科学というか、色々な人が集まって発展させた 1 つのコアではないかと思われるところです。どうもありがとうございました。

6. 第三部／KURに頼らない教育と研究、
複合研での展望

KUCAの燃料低濃縮化と将来計画

(京大複合研) 宇根崎 博信

KUCAの燃料低濃縮化と将来計画



京都大学 宇根崎博信

(複合原子力科学研究所、大学院エネルギー科学研究科)

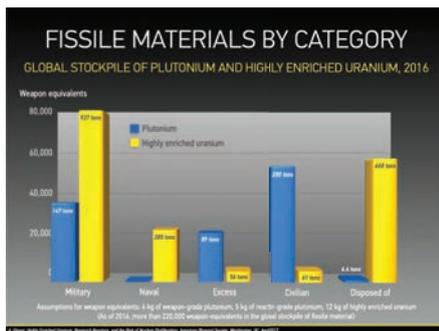


この講演の内容

- ✓試験研究炉と高濃縮ウラン・低濃縮化
- ✓KUCAの低濃縮化と将来計画



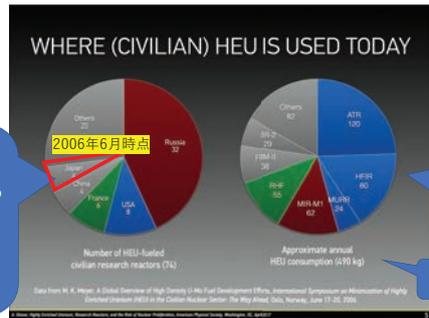
試験研究炉と高濃縮ウラン



- 試験研究炉：小型炉心＋高出力密度（＝高中性子束）
- これを実現するために高濃縮ウラン（HEU:大多数は濃縮度93%）を利用 → 1960年代から米国、ソ連が各国に供給
- 試験研究炉向け燃料として世界全体で50t程度のHEUが存在し、核不拡散、核セキュリティの面で大きなリスクという認識 → 世界的なHEU削減の取り組みに発展



試験研究炉と高濃縮ウラン



FCA, YAYOI, KUCA, UTR-KINKIの4基
→ FCA, YAYOI, KUCAのHEUは全量撤去済み
→ 2024年12月時点で我が国に残っているHEU利用炉はUTR-KINKIの1基

2006年6月時点
7基の試験研究炉で年間HEU供給の約80%を消費
490kg＝およそ20SQ

有意量(Significant Quantity; SQ)：IAEAの保障措置に定義される用語で、1個の核爆発装置の製造の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量
高濃縮ウラン（濃縮度20%以上）：ウラン-235量が25kg

試験研究炉の低濃縮化

- ① 高濃縮ウラン(HEU)燃料→低濃縮ウラン(LEU)燃料（濃縮度20%未満）への転換(LEU化)
- ② HEU燃料の国外（日本の場合は米国）への撤去(HEU撤去)

米国：海外からのHEU撤去（米国としてはHEU回収）が核不拡散政策上の最重要課題 → 条件付きで海外からのHEU回収を実施中。

- 当初は1996年～2006年の10年間（正確には2006年5月までに照射された使用済燃料を2009年5月まで引き取り）→2004年に期限が10年間延長された（2016年までに照射されたものを2019年まで引き取り）

日本：特例措置によりさらに10年間延長

この特例措置によりKURの運転を2026年まで延長することが可能となった

試験研究炉の低濃縮化 – LEU燃料

HEU燃料→LEU燃料への転換(LEU化)のためには、HEU燃料と同等の核特性を有するLEU燃料が必要 + 必要に応じて炉心設計の変更が必要

- 燃料内のU-235量を同じにするためにはU量を約5倍（＝93%/20%）とする必要あり：従来型（U-Al合金）では実現不可能 → 別の形態の燃料（高密度燃料）を採用する必要あり
- 現時点で実用化されているもの：U₃Si₂（ウラン密度の実用上限：4.8gU/cc）
- より高密度燃料が必要な場合：U-Mo合金ベースの燃料（ウラン密度上限：約17gU/cc）

一般論として、低濃縮化によって炉心の中性子利用特性が変化する

- LEU燃料内に（HEU燃料と）同じ量のU-235を装荷するとU-238量も増えるため、臨界性は劣化 → U-238増による中性子吸収増を相殺するため、さらにU-235量を追加する必要あり
- このために、同じ出力の場合は炉心の（熱）中性子束が一般的に低下
- U-235量増加、U-238量増加のため、中性子スペクトルも変化

特に、中性子束低下は高中性子束試験研究炉にとっては致命的な影響。

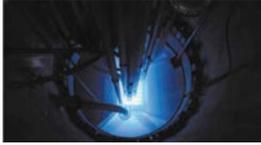
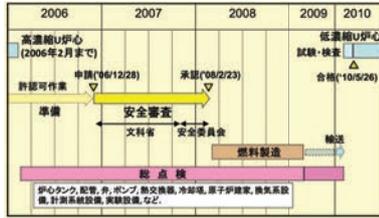
→ 炉心設計の変更、出力上昇、試験研究設備の設計変更等が必要となる場合あり

京都大学：KURの低濃縮化

スイミングプールタンク型原子炉
軽水減速・冷却、熱出力5,000 kW



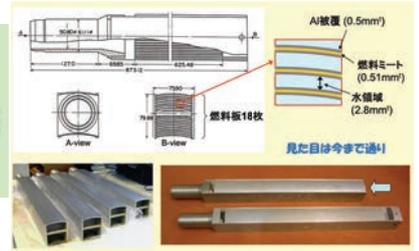
- 2006年2月23日に高濃縮ウラン燃料を用いた運転を終了
- 1997年から2007年にかけて複数回の輸送により高濃縮ウラン使用済燃料全量を米国に返送
- 2010年5月26日に低濃縮ウランを用いた炉心の性能検査に合格し4年ぶりに運転を再開



京都大学：KURの低濃縮化

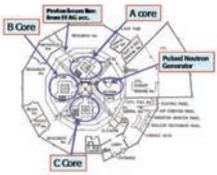
- 燃料の形状は同一として冷却材流動特性に影響を与えないこと
- 炉心の臨界性、制御棒反応度などの核特性の変化を最低限とし、安全性能に影響を与えないこと
- 実験特性（中性子束強度、中性子スペクトル）の劣化を最低限に

- 濃縮度低減:
93% [高濃縮U] → 20%未満[低濃縮U]
- U密度の増加: 0.58gU/cm³ → 3.2gU/cm³
- 燃料組成の変更:
U-Al (ウラン-アルミ合金) → U₃Si₂-Al (シリサイド)
- 最高燃焼度の増加:
25% of U-235 → 35% of U-235
- 燃料の外観・形状は変更なし



京都大学：KUCA（京都大学臨界実験装置）

炉心構造を容易に変更することができる原子炉であって、核燃料物質の臨界量等当該原子炉の核特性を測定する用にもつら供する研究用原子炉



最大出力100W（通常運転出力は1W未満）
軽水減速・反射炉心x1 + 固体減速・反射炉心x2



京都大学：KUCAの低濃縮化



KUCA低濃縮化に係る日米間の協議：**2005年頃から着手**
 ✓ KUCAを低濃縮化して、実験性能が保たれるのか
 ✓ 低濃縮ウラン燃料の使用により、KUCAの安全特性が損なわれないか
 +
 KUCA高濃縮ウラン燃料を既存の輸送容器で運搬できるか

- ◆ 米国として、当初のプログラムで低濃縮化できる試験研究炉はおおよそ目処が付いた→プログラムの対象外であった施設やHEU等を新たなターゲットに加える必要あり
- ◆ 米国として、対象外であったKUCAのHEUを撤去したい
- ◆ 日本政府として、更なる核セキュリティ措置としてKUCAの低濃縮化を進めたい
- ◆ 日米政府共に、原子力関連基礎研究と人材育成の観点から、KUCAの運転は継続させるべきがあり、そのためには「KUCAを低濃縮化できないと、HEUは撤去できない」ことで合意
- + 国内外の核セキュリティ規制の動向を鑑みると、高濃縮ウランを保有・使用し続けることは将来的に持続可能ではないと判断（国内規制強化、IAEA IPASSミッション報告、米国核セキュリティチーム視察のフィードバックなどから判断）

京都大学：KUCAの低濃縮化

- ✓ 米国ANLとの炉心核特性評価フェージビリティスタディを通じ、KUCA低濃縮炉心の特性を確認し、**低濃縮燃料での運転可能と判断**
- ✓ KUCA高濃縮ウラン燃料を既存の輸送容器(ES-3100)で輸送することは可能で、物理的な作業スペースも確保できることを確認



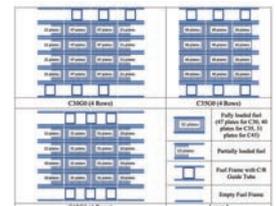
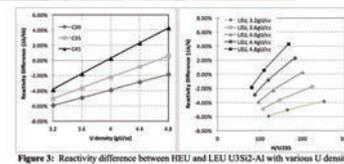
- 2016年第4回核セキュリティサミット日米首脳共同声明で**KUCA低濃縮化（HEU撤去、LEU転換）**を表明→プロジェクト本格始動。
- 2021年7月に高濃縮ウラン燃料を用いた運転を終了
- 2019年から2022年にかけて複数回の輸送により高濃縮ウラン燃料全量を米国に返送
- 2022年4月に低濃縮ウラン燃料利用の設置変更申請認可、2023年8月に低濃縮ウラン燃料製造のための設工認可認可→LEU燃料の製造と輸送を実施中

京都大学：KUCAの低濃縮化

米国ANLとの炉心核特性評価フェージビリティスタディの例（軽水減速架台）



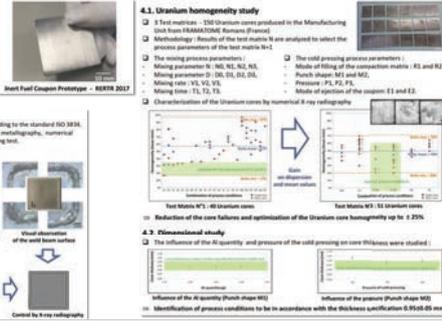
- **既存技術（ウランシリサイド燃料）を適用**
- 燃料板外観、構造は不変という条件
- LEU燃料のウラン密度を調整して、HEU炉心の互換性を最大限確保
- **LEU化による利用研究特性の向上**



京都大学：KUCAの低濃縮化

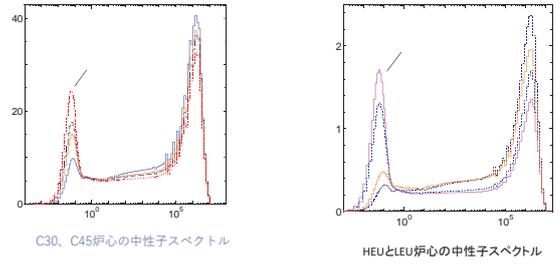
固体減速架台炉心向けLEU燃料：
U-Mo分散型燃料の製造技術に係る研究開発
(米-仏-日 共同研究)

- 新規技術（ウランモリブデン燃料）を適用
- 燃料板構造を変更
- LEU燃料のウラン密度と装荷量を調整して、HEU炉心との互換性を最大限確保
- LEU化による利用研究特性の向上



京都大学：KUCAの低濃縮化

KUCA低濃縮炉心の中性子スペクトル評価例



三澤毅教授 提供

KUCAからのHEU撤去

- 2019年から2022年にかけて、複数回の輸送により高濃縮ウラン燃料全量を米国に返送

使用していない湾曲板燃料から返送し、研究利用に必要な最低限の燃料を残しながら順次返送。2021年7月に高濃縮ウランによる運転を終了。

近年の日米の核セキュリティ政策上、重要な具体的成果として米国エネルギー省、文科省からプレスリリース(2022年8月)

複合研としての核物質安全管理—
国際レベルの核セキュリティ政策の成果

45 kilograms of highly enriched uranium safely removed from Japan and returned to the United States



日本原子力学会会誌にて試験研究炉の低濃縮化について解説
—管理業務成果の学術公開

複合研における管理負荷軽減

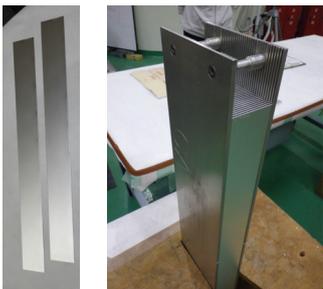
- 高濃縮ウラン全量撤去を受け、KUCAの核物質防護規制上の区分を区分IIから区分IIIに変更
- 研究所構内への入構手続きの緩和を含め、研究環境の改善と規制負荷の軽減、将来的に持続可能な規制対応体制を実現

京都大学：KUCA低濃縮化 進捗

- 2023年8月 低濃縮ウラン燃料製造 設工認 承認
- 同月 燃料製造開始
- 2024年4月 軽水架台用燃料製造完了、製造工場での事業者検査
- 2024年5月 軽水架台用燃料（第一バッチ）輸送開始（仏→米）
- 2024年7月 米国施設での日本向け燃料輸送容器への装填完了、発送前検査
- 2024年9月～10月 軽水架台用燃料（第一バッチ）輸送、受け入れ
- 2024年10月 固体減速架台用燃料（第一バッチ）製造完了、製造工場での事業者検査
 - 以降、固体減速架台用燃料（第二バッチ）製造を継続、
 - 2025年度 固体減速架台用燃料（第一バッチ）輸送、軽水架台用燃料（第二バッチ）輸送
 - 2026年度 固体減速架台用燃料（第二バッチ）輸送

京都大学：KUCA低濃縮化 進捗

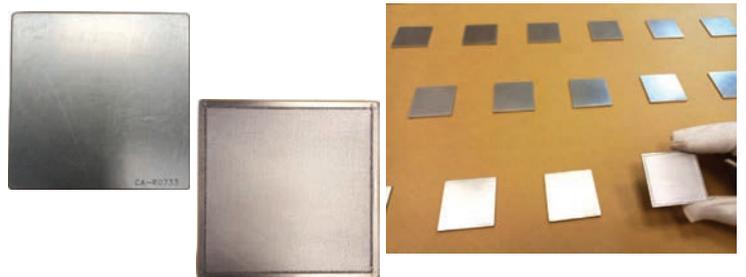
2024年10月23日 軽水架台用燃料受入



ウラン濃縮度 19.75%（公称値）、ウラン密度4.8gU/cc
ウランシリサイド合金（アルミニウム分散型）

京都大学：KUCA低濃縮化 進捗

2024年10月21日-25日 固体減速架台用燃料の製造工場での検査



KUCA低濃縮化とHALEU (“High-Assay LEU”)

KUCA低濃縮化

2000年代初頭からHEU低減化、すなわち国際的な核不拡散措置、核セキュリティ強化のための日米政府間プロジェクト+濃縮度20%未満の臨界実験データ（既存データが不足）の充実という炉物理/核データの観点からの機能アップ

HALEU

2020年ごろから米国が主導して革新炉向け燃料として研究開発を推進・USDOEのAdvanced Reactor Demonstration Program (ADRP)で2020年に採択された10基中9基がHALEUの使用を想定

General Atomics	HALEU	Consolidated	HALEU
Westinghouse	HALEU	Advanced	HALEU
Energy	HALEU	Westinghouse	HALEU
GE	HALEU	ARC	HALEU
Siemens	LEU	Advanced	HALEU
Energy	HALEU	Advanced	HALEU
Energy	HALEU	Advanced	HALEU

KUCA低濃縮ウラン燃料 = HALEU

「KUCAはHALEUを用いた系統的な炉物理実験が可能で唯一の施設」

京都大学：KUCA低濃縮化後の利用

応用

特徴

- 高濃縮ウラン返還を経て低濃縮化される臨界集合体として世界で初の施設
- U7-Mo低濃縮ウラン燃料で運転される世界で初の試験研究用原子炉
- HALEU (ウラン濃縮度約20wt%)を用いた世界で初の系統的な臨界/未臨界実験

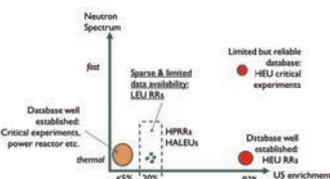
- 原子炉物理学、原子力工学（炉心設計）
- HALEUを含む濃縮度5%超ウランにかかる核データのV&V (“verification and validation”：検証と妥当性確認)
- 可変中性子スペクトル場の提供による研究開発シーズ発掘

- KUCA運転利用特性の拡充による、原子力/放射線利用関連の研究開発ニーズへの更なる対応
- 原子力/放射線利用関連人材育成のプラットフォームとしての展開

KUCA低濃縮化後の研究開発テーマ（1）

- 濃縮度20% (HALEU) の炉物理と原子力工学応用

- 濃縮度20%の臨界実験データベースの拡張
- HALEU利用革新炉研究開発
- HALEU輸送、保障措置技術開発
- U3Si2ベース燃料の発電炉利用応用 (SMRなど)



- ターゲットとするシステムの模擬性 = “representativity”を如何に評価するか
- どこまでrepresentativityを確保しうるか、確保するべきか

KUCA低濃縮化後の研究開発テーマ（1）

- 濃縮度20% (HALEU) の炉物理と原子力工学応用

高橋佳之先生・北村康則先生
MKB委員会資料より

世界で初めてのUMo低濃縮燃料の臨界実験装置
世界初のLEU燃料（濃縮度20%）を用いた体系的な臨界実験が可能

高濃縮燃料領域や実用炉などの5%以下の低濃縮燃料領域については実験データが豊富にあるが、20%の低濃縮燃料（HALEU）領域は実験データが世界的に著しく欠如している。

新型炉の設計、臨界解析（輸送を含む）等、計算誤差を評価する上でも非常に重要なデータ

低濃縮化後のKUCAが世界で唯一系統的なHALEUの実験データを供給できる

国内外の産官学から強い関心（現在米国、英国大学から共同研究の誘い）

新型炉 ThF, HCLWR, MSR, SMR, HTGR, 宇宙炉 etc

例えば、新型炉で使用される炉材料に関する研究
・吸収体のサンプルワークス
・新型炉で使う材料 (Na, Pb, Bi, Si, Be等) の核的影響評価
・炉心設計等に必要で数値計算に供する核データの検証

既存軽水炉に関する研究

・既存軽水炉に近い中性子エネルギースペクトルによる実験が可能となる
・パイルオシレータを用いた高温ドップラー測定

特にメーカーなどの民間企業が強い関心
官学も含めての共同研究を実施

- ターゲットとするシステムの模擬性 = “representativity”を如何に評価するか
- どこまでrepresentativityを確保しうるか、確保するべきか

KUCA低濃縮化後の研究開発テーマ（2）

- 「未臨界」の炉物理

→炉物理分野における未解明のテーマ

- これからの原子力利用を支えるために工学的、社会的にも重要なテーマ
- 廃止措置、使用済燃料貯蔵、核燃料輸送、福島デブリ管理、核セキュリティ、保障措置の高度化

未臨界の炉物理：炉物理分野における永遠のテーマの一つ

何に役立つ？

- 原子炉
- SFノール、輸送用キャスク、福島デブリ
- セキュリティ、保障措置分野

何を研究する？

原子炉・SFノール等

- 臨界安全性データ ρ_{crit} のベンチマークデータ
- 未臨界度測定法
- 未臨界度とは？ Keff or Ksource?
- 未臨界flux
- 未臨界反応度

Security, Safeguard分野

- 臨界安全
- 核燃料物質の存在、物質量が知りたい

CFなどのRIやバルスチューブなどの加速器を用いた地道な実験が必要

KUCAは、実験、計算、理論の3つの柱が全て実施可能

新しい理論手法の開発等
理論・実験等を含めた大々らしい研究の推進

- ターゲットとするシステムの模擬性 = “representativity”を如何に評価するか
- 実験手法（測定法、測定装置など）と解析手法の開発がどこまで必要なのか

KUCAを軸とした複合原子力研究の展開（案）





ご清聴ありがとうございました。

ハイパフォーマンス試験研究炉の低濃縮化

RERTR2022国際会議プログラムより

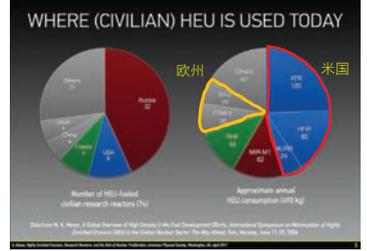
米国：高中性子束や中性子高度利用のためのハイパフォーマンス試験研究炉を5基保有
 → 既存のLEU燃料ではLEU化はできない（性能が劣化するので存在意義がなくなる、というロジック）
 → U-Mo高ウラン密度燃料を用いたLEU化に向けた研究開発を（延々と）継続中

Country	Reactor	Year	Operator	Notes
U.S.	High Performance Research Reactor	2022	ORNL	ORNL
U.S.	High Performance Research Reactor	2022	ORNL	ORNL
U.S.	High Performance Research Reactor	2022	ORNL	ORNL
U.S.	High Performance Research Reactor	2022	ORNL	ORNL
U.S.	High Performance Research Reactor	2022	ORNL	ORNL

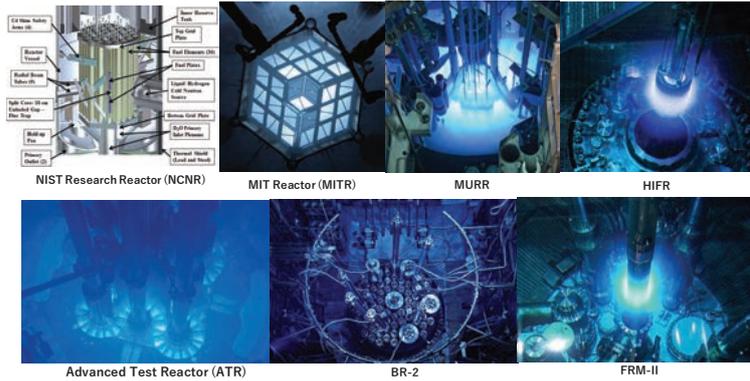
• ATR、HIFR、MURRの3基で世界の年間HEU供給量の約半分を占める

⇒ 「他の国の試験研究炉を自国の政策で半ば強制的にLEU化させているのに、自国で、しかも顕著なHEU供給が必要な炉のLEU化が進んでいないのは何事？」という批判的

欧州：ベルギーBR-2、ドイツFRM-IIの2基のハイパフォーマンス試験研究炉についても同様の状況。世界の年間HEU供給量の15%程度を占める。



ハイパフォーマンス研究炉



ハイパフォーマンス研究炉の低濃縮化：現状と課題

	U ₂ Si ₂ 4.8 gU/cc	U ₂ Si ₂ 4.8 gU/cc	U-Mo(wt%) 8.8 gU/cc	Monolithic 14 gU/cc	Years to conversion
ATR	35-40%	~30%	25-30%	LEU	14 years
HIFR	35-40%	~30%	25-30%	LEU	17 years
NBSR	~25%	LEU	LEU	LEU	12 years
MURR	~45%	~40%	~35%	LEU	12 years
MITR-II	~30%	~30%	20-25%	LEU	12 years
FRM-II	~50%	~30%	30%	LEU	n/a
BR-2	~27%	~22%	LEU	LEU	n/a
JHR	~27%	~22%	LEU	LEU	n/a
RHF	~27%	~22%	LEU	LEU	n/a

低濃縮化達成までには長期間必要という見込み

大量の低濃縮ウラン燃料を商業的に安定供給できるサプライチェーンの確立が必要

京都大学：KUCAの低濃縮化 - HEU返送

- 2019年から2022年にかけて複数回の輸送により高濃縮ウラン燃料全量を米国に返送
- 使用していない燃料から返送し、研究利用に必要な最低限の燃料を残しながら順次返送。2021年7月に高濃縮ウランによる運転を終了。

	U bearing Coupons	U bearing Plates	U bearing other
Items to Pack	6816	1548	20
Enrichment (%)	93	93/45	93
Covering	Epoxy	Aluminum Clad	Canned

ウラン総量約45kg
 総アイテム数 > 8000
 延べ輸送容器数 > 70基



京都大学：KUCA低濃縮化 進捗

2024年10月23日 軽水架台用燃料を輸送容器から取り出し、受入点検



ウラン濃縮度 19.75% (公称値)、ウラン密度4.8gU/cc
 ウランシリサイド合金 (アルミニウム分散型)

京都大学：KUCA低濃縮化 進捗

2024年10月23日 燃料要素 組み立て点検



第三部 KUR に頼らない教育と研究、複合研での展望 質疑応答

6. KUCA の燃料低濃縮化と将来計画 宇根崎 博信

杉山： ありがとうございます。事始めもお話頂いて、私も改めて勉強になるお話でした。色々な方面に今後も役に立つことを目指しておられるという観点でした。それではご質問頂ければと思います。

中島： 研究で HALEU の活用や、未臨界の炉物理のテーマを挙げられていて、これから外部のアカデミアの部会等を通して発展して頂けると思っています。もう 1 つの柱である教育は、今までやってきた院生実験教育はまた出来ると期待していますが、それをもう少し・・・例えば今、原子力の最大限活用との声があり、色々なところで人材育成が言われていますが、例えばそういうことを考えて社会人を対象にするとか、視野を広げたような教育活動は何か考えていませんか？

宇根崎： 私自身考えがそこまで至っていませんが、今まで原子力工学を目指す学生さんが対象でした。それから社会人教育と言っても原子力に興味を持っている方や、近畿大学さんでやられているような放射線教育に携わっている教員の方の実験教育がメインでありました。私自身は将来の中で未臨界の炉物理とも関連した、保障措置、臨界安全管理、核物質検知を考えると、例えば原子力は導入していないけど、核セキュリティや放射線安全、保障措置に携わっている東南アジア諸国の規制等々の方々を対象とした国際的な教育の可能性はあるのではないかと考えます。文科省の FNCA というプログラムを継続していて、そういう会議に行きますと人材育成に関するニーズがかなり高い。原子力機構の ISCN (核不拡散・核セキュリティ総合支援センター) で実施しているような教育に加え、実際の炉や、手で持って分かるくらいのウラン、核燃料を使った核セキュリティ、核不拡散、保障措置関係の教育を新たな軸として追加することで複合研の国際的な貢献にも役立つのではないかと個人的には考えます。

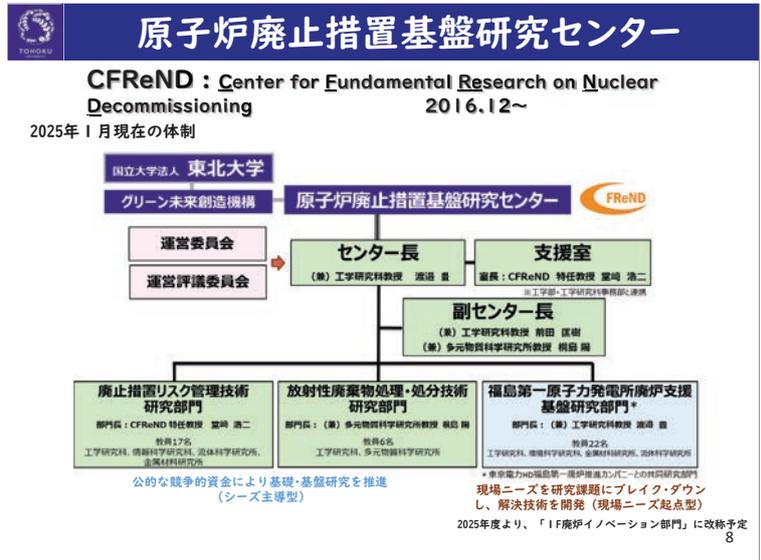
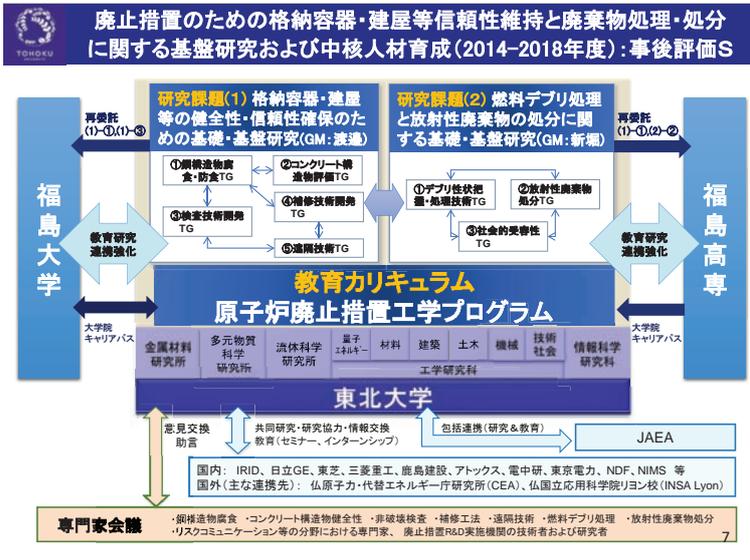
中島： ありがとうございます。社会人や海外展開、特に熊取がアジアの人材育成の拠点になるような拠点になればいいなど。IAEA などとも協力して頂ければと思います。

杉山： ありがとうございます。その他のご質問は Google Form 等を使ってお願い致します。ありがとうございます。

7. 第四部／廃止措置に関する教育と研究、
良好事例の紹介

東北大学の取り組み（招待講演）

（東北大学）渡邊 豊



CFReND専門分野グループ

<リスク管理・保全技術> 工学研究科

堂崎浩二 (廃炉センター)

<腐食評価・対策技術> 工学研究科 金属材料研究所

渡邊 豊 (工: 量子エネルギー工学)

CFReND専門分野グループ

<コンクリート構造物評価> 工学研究科

前田 匡樹 (工: 都市・建築学)

<非破壊検査技術> 流体力学研究所 工学研究科

内一 哲也 (流体力学研究所)

CFReND専門分野グループ

<補修技術> 工学研究科

小川 和洋 (工: 先端材料強度科学研究センター)

<放射線計測/利用> 工学研究科 金属材料研究所

松山 成男 (工学研究科)

CFReND専門分野グループ

<デブリ性状評価> 多元物質科学研究所

桐島 陽 (多元物質科学研究所)

<廃棄物処分技術> 工学研究科

新堀 雄一 (工: 量子エネルギー工学)

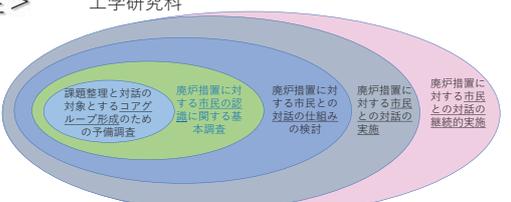
CFReND専門分野グループ

TOHOKU

<社会的受容性> 工学研究科



高橋 信
(工：技術社会システム)



13

福島第一原子力発電所廃炉支援基盤研究部門

(東京電力HD福島第一廃炉推進カンパニーとの共同研究部門) **TEPCO**

TOHOKU

■本部門の狙い

廃炉事業の実施主体である東京電力の技術者と本学エキスパートとの密接なコミュニケーションに基づいて現場ニーズを研究課題にプレイクダウンし、東北大学が有する広範な分野での研究ポテンシャルを活用して廃炉現場の課題を解決するための研究開発を行う。



- ◆事業運営
センター長他東北大、東京電力をメンバーとする部門運営委員会
- ◆研究実施
採択課題担当教員+大学院生
- ◆期待される成果
➢福島第一原子力発電所1~4号機の安全・着実な廃炉推進に資する新規技術の開発ならびに新規知見の獲得
➢関連分野の若手研究者・技術者育成の推進

- 廃止措置リスク管理技術研究部門
- 放射性廃棄物処理・処分技術研究部門
- 福島第一原子力発電所廃炉支援基盤研究部門：現場ニーズ起車型

：シーズ主導型

2つの異なるアプローチで研究・開発する体制

14

廃炉加速化研究プログラム<日仏原子力共同研究>

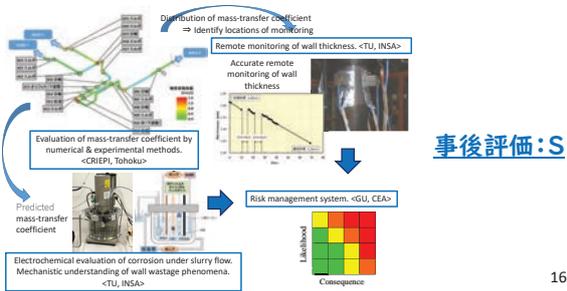
TOHOKU



配管減肉のモニタリングと予測に基づく配管システムのリスク管理

Piping System, Risk management based on wall thinning Monitoring and Prediction (PYRAMID)
2017.11~2021.3

【日】東北大 **CFReND**, 電中研, 群馬大 【仏】INSA-Lyon, ElyTMaX, CEA



事後評価:S

16

Fukushima Research Conference

Corrosion Prediction and Mitigation for Key Components of Fukushima Daiichi NPS
Organized by CLADS/JAEA, Tomioka-cho, Fukushima, Nov. 27-29, 2017
Dec. 9-11, 2019
(Next conference planned for 2022)



- ◆ Long-term prediction of carbon steel corrosion
- ◆ Radiolysis effect on corrosion
- ◆ Re-passivation of localized corrosion
- ◆ Microbial influenced corrosion
- ◆ Reinforced concrete corrosion

Conference Chair: Damien Féron (CEA)
Vice-Chairs: Y. Watanabe (Tohoku UJ), M. Yamamoto (JAEA)
Invited Lecturers: D. Féron, Y. Fukaya, K. Hata, F. King, V. Hostis, P. Marcus, J. Matsumoto, B. Normand, R. Rebak, N. Sridhar, N. Tanaka, Y. Watanabe, J.C. Wren

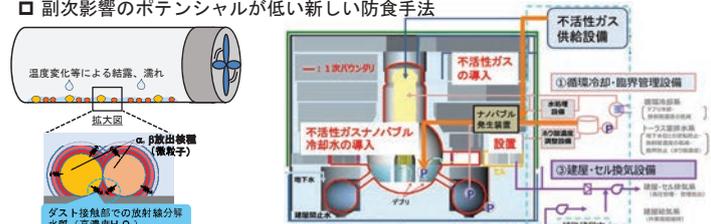
課題解決型廃炉研究プログラム (2020年度~2022年度)

『 $\alpha/\beta/\gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内区域防食の実現: ナノバブルを用いた新規防食技術の開発』

東北大学 **CFReND** · JAEA · QST · NIMS

- 1F1~3号機PCV内部における腐食環境の特殊性は、燃料デブリ由来の α 線/ β 線放出核種の粒子やイオンと構造材料が直接接触し得ること。
- 皮膜型インヒビターには局部腐食のリスクが潜在するため、酸化剤低減の方法をトライする。

- 接触線源からの α 線/ β 線効果をも含むラジオリシス解析モデル
→ α 線/ β 線放出核種と鋼材が接触共存する条件下での腐食速度予測技術
- 新設設備の材料選定根拠 (※負圧維持系機器・配管、デブリ取り出しツール、収納缶等)
- 副次影響のポテンシャルが低い新しい防食手法



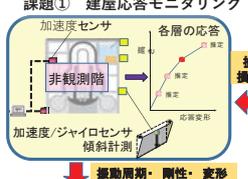
課題解決型廃炉研究プログラム (2021年度~2023年度)

『モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究』

東北大学 **CFReND** · 東工大 · 芝工大 · 日本工大 · 木更津高専

- 1F1~3号機原子炉建屋の特殊性は、高放射線量率等により、接近が困難なため、ダメージを受けた建屋の現状把握や長期健全性評価などが難しいこと。
- 建屋への接近を最小限とする建屋健全性評価法と検査計画を提案する。

課題① 建屋応答モニタリング



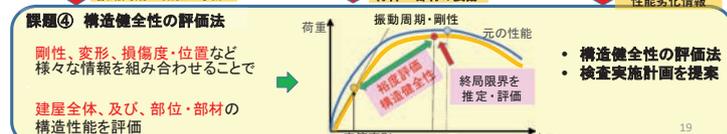
課題② 電磁波による損傷検知



課題③ 材料・部材の性能評価



課題④ 構造健全性の評価法



19

人材育成への取り組み

教育プログラムの構築と研究実践に基づいた人材育成

福島第一原子力発電所の安全な廃止措置への貢献

基礎研究の成果 → 中核人材の輩出

文科省プロジェクト

福島高専

福島大学

東北大学 (工学研究科、情報科学研究科、附属研究所)

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

国際原子力研究開発機構 (IRF)

研究課題: 8つのTG

- ① 鋼構造物腐食・防食
- ② コンクリート構造物評価
- ③ 検査技術開発
- ④ 補修技術開発
- ⑤ 遠隔技術
- ⑥ デリビリティ把握・処理技術
- ⑦ 放射性廃棄物処分
- ⑧ 社会的受容性

④「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(NDEG)」の構築・第1回開催

本学授業に賛同下さった採択7機関により共催「CLADS主催の定例会議」を開催

2019年3月 東北大学
2019年2月 東京工業大学
2019年2月 福島県立国際原子力工学研究所
2019年2月 福島県立国際原子力工学研究所
2019年2月 福井大学
2019年2月 京都大学
2019年2月 東京科学大学
2019年2月 福井大学

⑤「第3期人材育成型実知事業への応募・採択

「燃料デブリ」研究とSEEM学構築を基盤とした研究人材育成」2024年9月～2030年3月末

博士課程後期(博士) 科目表

区分	授業科目	単位と履修方法	備考
廃止措置工学 基礎科目	原子炉廃止措置工学特論Ⅰ: 概論	2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅱ: 廃食防食分野	2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅲ: 検査技術分野	2	
	原子炉廃止措置工学特論Ⅳ: 燃料デブリ処理分野	2	上記授業科目から4単位以上選択履修すること
	原子炉廃止措置工学特論Ⅴ: V&V&コミュニケーション分野	2	
	リーダー論	1	
	トッリーダー特別講義		
	原子炉廃止措置工学特別講義		

博士課程前期(修士) 科目表

区分	授業科目	単位と履修方法	備考
廃止措置工学 学基科目	原子炉廃止措置工学概論	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅰ: 鋼構造物保全分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅱ: 放射線材料分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅲ: 廃食防食分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅳ: 環境復元分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅴ: 非破壊検査分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅵ: 補修・接合分野	1	
	原子炉廃止措置工学Ⅶ: コンクリート構造物保全分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅷ: 建設材料分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅸ: 耐震設計分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅹ: 耐震性評価分野	2	上記授業科目から必修2単位を含めて5単位以上選択履修すること
	原子炉廃止措置工学Ⅺ: 建築物寿命評価分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅻ: 建築物信頼性分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅼ: 地盤沈下分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅽ: 地震工学分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅾ: V&V&コミュニケーション分野	2	
	原子炉廃止措置工学Ⅿ: 人間-IT・V&V&コミュニケーション分野	2	
	原子炉廃止措置工学ⅰ: 行動分析分野	2	
	原子炉廃止措置工学ⅱ: 弾塑性力学分野	1	
原子炉廃止措置工学特別講義	2		
廃止措置R&Dインターンシップ研修	1~2		
国際インターンシップ研修	...		

コア科目「原子炉廃止措置工学概論」集中講義

<必修>廃止措置R&Dインターンシップ研修

『原子炉廃止措置工学プログラム』科目表

原子炉廃止措置工学プログラム 修士コア科目『原子炉廃止措置工学概論』公開講座として→『軽水炉安全セミナー(原子炉廃止措置編)』

期	概論		各論	
	9月24日(火)	9月26日(木)	9月26日(木)	9月30日(月)
1期 (8:50-10:20)	8:50-10:40 開講式・挨拶 9:10-10:40 リスクの概念とリスク評価・管理の基礎 (東北大学: 高橋浩二)	福島第一の廃炉の目的と戦略(NDF: 中村隆之)	燃料・構造物の機械的健全性と経年劣化の重要性 ～廃食現象と放射線影響～ (東北大学: 渡邊豊/山本正弘)	8:50-10:40 燃料の閉鎖化学と燃料デブリの基礎 (東北大学: 佐藤健)
2期 (10:30-12:00)	11:55-13:40 原子力発電所安全管理、設備管理の考え方 (東北大学: 室崎浩二)	福島第一の廃炉研究開発の現状と課題 (IRF: 高橋浩二)	原子力発電所の廃止措置における遠隔技術の役割と適用技術 (東北大学: 眞野隆博)	11:55-13:40 燃料デブリの分析について (CLADS: 眞野隆博)
3期 (13:00-14:30)	13:55-15:40 原子力発電所の廃止措置の取り組み状況 (中野電力: 生田謙平)	類似したコンクリート構造物の長期健全性評価の考え方 (東北大学: 前田直樹)	廃炉作業に伴うロボット技術の開発と現場適用の状況 (日立GE: 岡田聡)	燃料デブリの特性把握と処理・処分について (JAEA: 北澤重/坪田隆一)
4期 (14:40-16:10)	福島第一原子力発電所の現状と今後の展望 (東京電力: 松本純一)	TMI及びチェルノブイリの経験から学ぶもの、福島へ反映できるもの (東北大学: 菅林勇)	廃炉作業に伴うロボット技術の開発と現場適用の状況 (東京電力: 野崎一)	14:40-16:10 放射線廃棄物の管理・処分 (東北大学: 高橋浩二)
5期 (16:20-17:50)	福島第一原子力発電所事故の概要と教訓 (東京電力: 松本純一)	放射線計測技術 (東北大学: 松山成典)	廃炉に向けた異分野を繋ぐ放射線計測機器の研究開発から見えるもの (理化学研究所: 長野泰希)	16:20-17:50 課題・修了後のフォロー (東北大学: 高橋浩二)

NDF: 原子力損害賠償・廃炉等支援機構 IRF: 国際原子力研究開発機構 JAEA: 日本原子力研究開発機構

大学院工学研究科・情報科学研究科 『原子炉廃止措置工学プログラム』履修学生数ならびに進路

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合計
	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	
修士修了人数	19	21	18	19	11	2	2	3	7	102
博士修了人数	0	0	2	3	1	0	0	2	1	9
修了人数合計	19	21	20	22	12	2	2	5	8	111
内訳										
博士課程進学	3	1	1	2	1		0	1	3	12
電力会社	4	4	3	0	2		1	2	0	16
重工業メーカー	2	1	1	1	2		0	0	1	8
鉄鋼メーカー	0	2	1	3	1		0	0	0	7
官公庁・自治体 (環境省・福島県・福島県立総合研究機構)	0	2	1	1	0		0	0	0	4
ゼネコン	2	1	3	2	1		0	0	1	10
研究機関 (大学教員・JAEA)	0	0	3	4	0		0	1	1	9
原子力関連合計	11	11	13	13	7		1	4	6	66
原子力関連割合(%)	58	52	65	59	58		50	80	75	61
その他企業等	8	10	7	9	5	0	1	1	2	43

注) 2020年度(令和2年度)の2名は、修了人数には含まれていないが、原子力関連割合の計算における修了者の合計、原子力関連合計(分母・分子)には含まれていない。

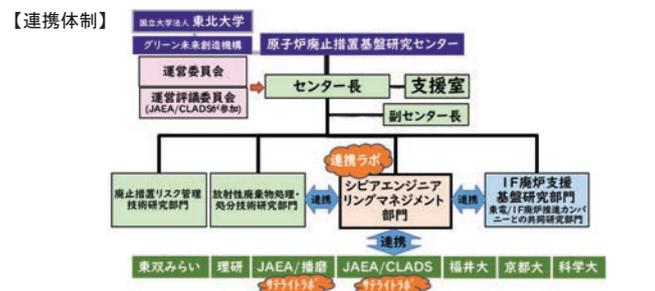
「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和6年度～令和10年度)

課題名: 燃料デブリ研究とSEEM学構築を基軸とした研究人材育成

- 代表機関 : 東北大学
 連携機関 : 日本原子力研究開発機構
 再委託機関 : 福井大学、京都大学、東京科学大学
 理化学研究所
 東双みらいテクノロジー(株)

目的と連携体制

【研究目的】
 本提案は、不確実な苛酷環境下において、より合理的な意思決定を可能とする『シビアエンジニアリングマネジメント学(SEEM学)』の構築に資することを主眼とし、併せて、福島第一原子力発電所(1F)廃炉における中心課題である燃料デブリの取り出し・長期保管および処理・処分の学術基盤を支える研究人材の育成を図るため、異分野の専門家が有機的連携の下で複数の研究ならびに人材育成タスクを推進するものである。





SEEM学分野

SEEM学構築を目指したレジリエンスベースの社会的意思決定に関する研究
 分担者：東北大、福井大・伝承館、理研、東双みらい、JAEA/CLADS

専門分野1

U-Fe-O系を題材とした燃料デブリの物質科学的理解向上のための基礎研究
 分担者：東北大、JAEA/CLADS

専門分野2

燃料デブリを含む廃棄物の新規廃棄体手法の開発
 分担者：東北大、京大 JAEA/CLADS

共通工学分野1

先端放射光技術を用いた燃料デブリの構造解析プラットフォームの開発
 分担者：東北大、JAEA/CLADS

共通工学分野2

熱力学的予測技術の高度化とデブリの生成過程・性状推定への応用
 分担者：東北大

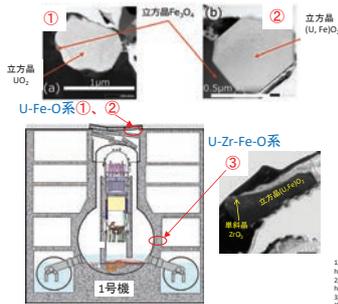
共通工学分野3

加速器中性子源とアクティブ中性子法を組み合わせた廃棄物中の燃料物質非破壊分析法の開発
 分担者：東北大、科学大

教育プログラム

- 原子炉廃止措置工学プログラム
 - 研究開発成果の反映
 - SEEM学要素の反映
 - 社会人学び直し
- 分担者：東双みらいテクノロジー

専門分野①『U-Fe-O系を題材とした燃料デブリの物質科学的理解向上のための基盤研究』



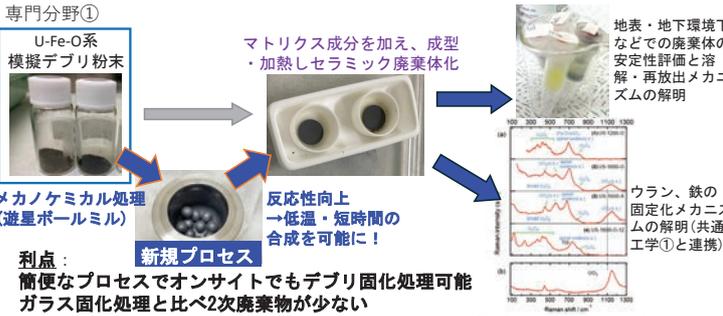
デブリ性状予測の基盤となるU-Fe-O系熱力学状態図の実験による検証とアップデートを実施

- 試験的に取り出された実デブリの分析（@国プロ）での分析結果の解釈のための“地図”ともいえる基盤情報「熱力学状態図」を提供。
- 今後、様々な多元素系での熱力学状態図の整備・更新が必要になる。本課題に大学院生が真摯に取り組むことで、このような学術基盤を支える研究人材を育成する。

1) 東京電力ホールディングス株式会社、1-3号機燃料格納容器内調査用ロボット車体の分析結果、2022年11月、https://www.met.go.jp/press/2022/11/03/20221103_01.pdf (accessed July 2023);
 2) 東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所にて取得した燃料デブリの分析結果、2022年4月、https://www.met.go.jp/press/2022/04/03/20220403_01.pdf (accessed July 2023);
 3) 放射線防護協会、国際原子力燃料デブリ調査委員会、令和3年度調査報告書「汚染対策事業推進委員会」に係る補助事業「燃料デブリの性状推定のための分析・鑑定技術の開発」、<https://www.iaea.org/ip-cc/content/uploads/2023/04/20230201syohohaku202306.pdf> (accessed July 2023).

専門分野②『燃料デブリを含む廃棄物の新規廃棄体化法の開発』

U-Fe-O系模擬燃料デブリの新規セラミック固化プロセスの構築と固定化・溶解メカニズムの解明



- 期待される成果
- 複雑な性状の燃料デブリに対して柔軟に対応できる新規セラミック固化プロセスを開発する。
 - 燃料デブリの長期保管及び処理・処分という不確実性が高い事象に対して、廃棄物の固定化メカニズムや、溶解・再放出メカニズムが十分に理解された廃棄体化プロセスを提供する。

共通工学①『先端的放射光技術を用いたマルチスケールデブリ分析プラットフォームの構築』

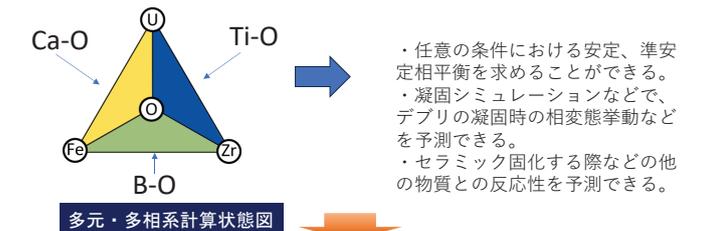
模擬デブリ等の共通試験料を対象として、ミリ〜マイクロ〜ナノスケールをカバーする放射光分析技術（イメージングXAFS、マイクロXAFS/XRF/XRD同時計測、STXM）を高度化、高速化し、ラボ分析（SEM-EDX、TEM/FIB）との連携を強化し、課題解決のためのマルチスケールデブリ分析プラットフォームを構築する。



- 期待される成果
- 燃料デブリの性状解明及び処分方法の検討材料情報を、マルチスケールで整理された形で提供する。これにより、効率的・効果的な実試料分析へと展開できる。
 - 放射光分析技術の高度化と本申請の課題解決のための分析を両輪として進めることで、放射光と廃炉（廃止措置）の双方に精通するプロフェッショナルな若手人材を育成する。

共通工学②『熱力学的予測技術の高度化とデブリの生成過程・性状推定への応用』

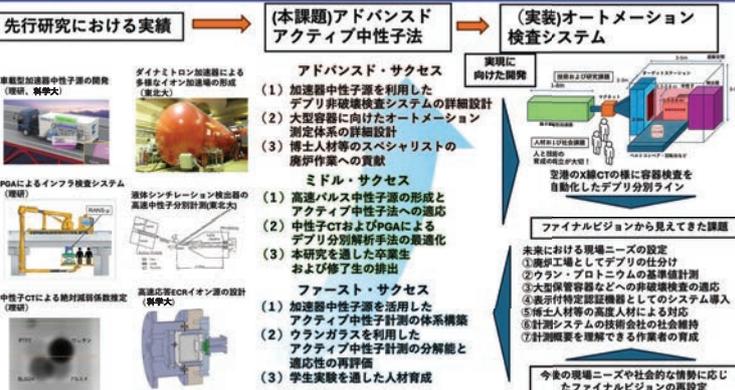
Uを含む酸化物を表現するのに適した熱力学モデルを探索し、U-Fe-O、U-Zr-O、Fe-Zr-O系の熱力学的解析からパラメータを決定し、U-Fe-Zr-O系熱力学データベースを構築するとともに、計算からデブリの相変態挙動などを明らかにする。



- 期待される成果
- デブリの形成機構や凝固時の相変態および他の物質との反応性などを予測することが可能となり、不確実性を効果的に低減できる。
 - あらゆる材料分野で組織の定量シミュレーションが必要となった場合に広く役立てることができる技術を開発する。

共通工学③『加速器中性子源とアクティブ中性子法を組み合わせた廃棄物中の核燃料物質非破壊分析法の開発』

オートメーションデブリ非破壊検査システムの展開に向けて加速器中性子源ベースの中性子CTおよびPGAを応用したアクティブ中性子法によるデブリ分別手法を構築する。



『SEEM学構築を目指したレジリエンス空間の社会的意決定に関する研究』(1) 33

社会科学

不確実性を低減させる技術的な取り組み【専門分野】 + 【共通分野】

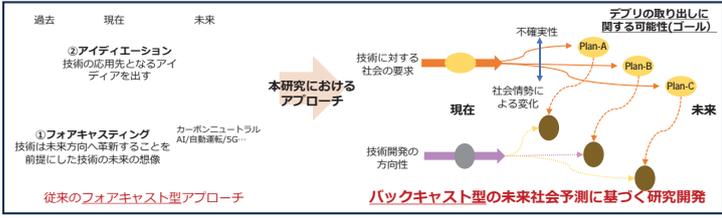
- U-Fe-O系を題材とした燃料デブリの物質科学的理解向上のための基礎研究【専門分野1】
- 燃料デブリを含む廃棄物の新規廃棄体化法の開発【専門分野2】
- 先進的放射光技術を用いたマルチスケールデブリ分析プラットフォーム【共通分野1】
- 燃料デブリの生成過程や生成後の性状の熱力学的予測技術の開発【共通分野2】
- 加速器中性子源とアクティブ中性子法による廃棄物中の核燃料物質非破壊分析法開発【共通分野3】

- 次に進むべき技術的取り組みの方向性のアップデート
- このサイクルを回すことにより「私たちの社会にとって好ましい状況」を目指した基礎研究の推進を実現

不確実な状況下における意思決定【SEEM学分野】

- SEEM学構築を目指したレジリエンス空間の社会的意決定に関する研究

従来のフォアキャスト型ではなくバックキャスト型の未来社会予測に基づく研究開発のフレームワーク



教育プログラム 34

人材育成

1. 原子炉廃止措置工学概論 (原子炉廃止措置工学プログラムのコア科目)

講義番号	概論		各論	
	9月24日(火)	9月25日(水)	9月26日(木)	9月29日(月)
1講 (10:00-10:30)	5/25更新 概論講義概論 (東北大学)	燃料第一の廃止措置の技術戦略プラン (NDF)	廃炉・廃棄物の種類と性状と燃料デブリの性状 ～放射性と放射線影響～ (東北大学)	燃料の放射化学と燃料デブリの基礎 (東北大学)
2講 (10:30-12:00)	燃料デブリの性状とリスク評価・管理の基礎 (東北大学)	燃料第一の廃止措置の現状と課題 (NDF)	原子力発電所の廃止措置における選定技術の役割と選定技術 (東北大学)	燃料デブリの性状と燃料デブリの性状の基礎 (JAEA)
3講 (12:00-12:30)	原子力発電所の廃止措置の取り組み状況 (中部電力)	廃炉に向けたコンクリート構造物の長期健全性評価の考え方 (東北大学)	廃炉作業におけるロボット技術の現状と今後の展望 (日立GE)	燃料デブリの性状と燃料デブリの性状の基礎・処分について (JAEA)
4講 (12:30-13:00)	燃料第一の原子力発電所の現状と今後の課題 (東北大学)	TM及びフェルミオイドの燃料デブリの性状 (東北大学)	廃炉作業におけるロボット技術の現状と今後の展望 (日立GE)	燃料第一の原子力発電所の現状と今後の課題 (東北大学)
5講 (13:00-13:30)	燃料第一の原子力発電所事故の調査と報告 (東京電力)	放射線計測技術 (東北大学)	廃炉に向けた廃止措置を整える放射線計測技術の現状と今後の展望 (理化学研究所)	燃料第一の原子力発電所の現状と今後の課題 (東北大学)

2. 東北大学全学授業「福島の復興・再生」において 福島復興と工学① (福島第一原子力発電所の廃炉と安全確保) を講義 (11/28)

3. 社会人学び直しのためのSEEM学セミナー ウラン化学と燃料デブリに関する出前講義@1F (第1回: 11/15、第2回: 12/13、第3回: 2/14予定) 34

3. 学生・若手教員向けSEEM学セミナー 35

人材育成

情報が圧倒的に不足していたり不確実性が高い状況下での意思決定を行う特殊な職種あるいは経験を有する人物を定期的に招いて、レクチャーとディスカッションを繰り返し、不確実性を乗り越える方法を見出していくこと(通底する原理の発見や方法論の体系化)を試みる。

講師の候補としては、航空機操縦士、宇宙(フライトディレクター)、海洋(深海探査リーダー)、感染症(政府コロナ対応チーム)、大規模災害医療チーム(DMAT)、電力ネットワーク管理者、外交官(とくに政情不安定な国で等々の大使経験者)、投資銀行等での危機対応責任者あるいはアクチュアリー、自衛官/海上保安官、化学コンビナート地区の消防機関、登山家、プロ棋士などが挙げられる。

これら専門家との意見交換を企画する学生のコア・グループを結成する。SEEM学セミナーの開催頻度は4回～6回/年。学生コメンターは、教員と共に、①質問の作成、②回答の分析・解釈・整理、③講師候補リストアップ等を議論する(web会議あるいは対面会議)。

第1回SEEM学セミナー

(2025年3月18日午後@東北大学 予定)

講師: Ms. Kristine L. Svinicki
U.S. NRC 前・委員長(第1次トランプ政権下)
TerraPower社 Board Member
University of Michigan非常勤教授



35

研究マネジメント 36

研究マネジメント

▶ 連携ラボ設置@東北大学CFReND、サテライトラボ@JAEA播磨、JAEA/CLADS

▶ 連携ラボ会議@東北大学片平キャンパス (2024年12月20日)

▶ 各タスクチーム内での打ち合わせ (随時)

▶ 1F廃炉事業全般ならびに燃料デブリ取り出しについて、「ニーズ側(東双みらい技術者)とシーズ側(本事業の研究者)との意見交換会」を開催予定(時期は2025年1～2月を予定)。東双みらいテクノロジ側参加者は、燃料デブリの移送・保管のエンジニアリング業務に従事する若手技術者が中心。各研究タスクの目的の再確認と目標のアップデート。

研究項目	研究タスク責任者	研究分担先
【専門分野1】 U-Fe-O系を題材とした燃料デブリの物質科学的理解向上のための基礎研究	桐島陽 (東北大)	東北大、JAEA、JAEA-CLADS
【専門分野2】 燃料デブリを含む廃棄物の新規廃棄体化法の開発	秋山大輔 (東北大)	東北大、京大、JAEA、JAEA-CLADS
【共通工学分野2】 熱力学的予測技術の高度化とデブリの生成過程・性状推定への応用	及川勝成 (東北大)	東北大
【共通工学分野3】 加速器中性子源とアクティブ中性子法を組み合わせた廃棄物中の核燃料物質非破壊分析法の開発	奥野泰希 (理研)	東北大

事故炉廃炉研究は東北大学建学の精神実践の場 37

東北大学グローバルビジョンからの抜粋
(+渡邊の解釈)

研究第一主義

日々の研究の実践を通じて未来を担う若者の育成にあたる。

実学尊重

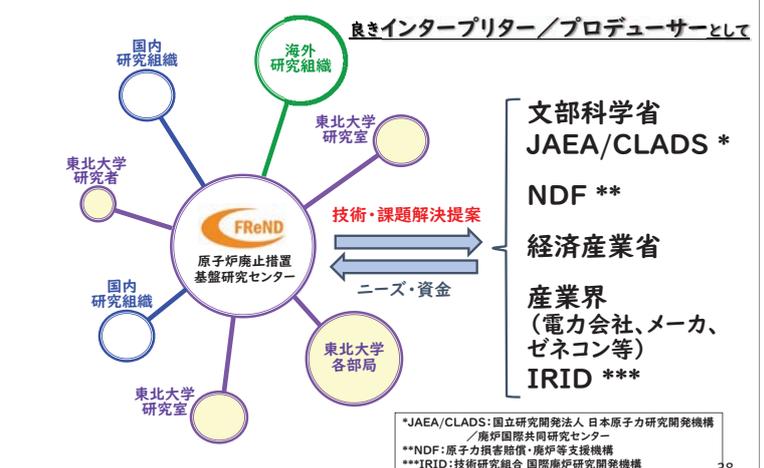
学術的にも真に価値の高い研究課題は、現場から見いだされる。

門戸開放

多様な価値観・人材を受け入れる知の共同体。(=多様性の尊重)

37

研究連携ハブとしてのCFReND 38



*JAEA/CLADS: 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 / 廃炉国際共同研究センター
**NDF: 原子力損害賠償・廃炉等支援機構
***IRID: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

38



皆さまのご支援に感謝しております。
東北大学の廃炉研究・人材育成に対して、
引き続きご支援・ご協力のほど
よろしくお願い申し上げます

We would appreciate your continued
support and cooperation.

第三部 廃止措置に関する教育と研究、良好事例の紹介 質疑応答

7. 東北大学 原子炉廃止措置基盤研究センターの活動について（招待講演）

渡邊 豊（東北大学）

杉山： 渡邊先生、大変興味深く勉強になるお話をありがとうございました。それではご質問をお願いします

黒崎： 渡邊先生、ありがとうございます。まさに良好事例で勉強になりました。廃止措置や廃炉になると、「本当にそこに研究のネタがあるのか？」とか「若者を引き付けるものがあるのか？」を気にするのですが、今回のお話を聞かせて頂いて、研究という意味では物凄く沢山ありますし、人材育成、教育という面で若者を引き付けているのが良く分かり、参考にさせて頂く話ばかりでした。質問ですが、「廃炉・廃止措置」というと若干後ろ向きで、あとは終わりというイメージがどうしても付いてくると思うのですが、若い人達、実際に頑張っている学生さん達はそこをどう考えているか、あるいは先生がどういう工夫をしているかを教えて頂ければと思います。

渡邊： ありがとうございます。まず多くの学生が積極的に興味を持ってくれる、あるいは自分の進路を選択してくれることは期待していませんし、それは無理がある話と思います。特に原子力以外の学生は広い選択肢が目の前に沢山あるので、そこを期待する訳ではないですが、一方で原子力以外のところから廃炉に興味を持ってやりたいと言ってくれる学生は多くはないですが居ます。その人達を失望させないのがまず1つ。それから何が本質的に大事かという嗅覚を持った若者がちゃんと居ます。例えば、札幌南高校の2年生から「福島の新廃炉をやりたいけど、どこへ進学すればいいですか？」とメールを突然貰いました。「東北大学にいらっしゃい」と返信しましたら、東北大学に本当に入学してきてくれ、今はバックエンドの研究室で大学院生をしています。そういう学生も少数いて、それで十分ではないか？と思っていること。あとはなるべく、一年生の導入教育で少し協力しているとか、シーム学は廃炉に関わらず広い分野で今後混沌とした世の中で必要な分野だと思うので、そういうところなるべく色々な若者の興味に答えていくなどくらいでしょうか。

黒崎： ありがとうございます。我々としては「廃炉・廃止措置」はKURの廃止措置として1つのキーワードとして研究所の中に出てきますので、今日の先生のお話を参考に将来計画を考えていきたいと思っています。

杉山： 私からも1つ質問があります。お話に大変感銘を受けました。廃炉が新しい研究を生み出しているところもありますし、従来のマテリアルサイエンス等にも展開し

ていて、1つ1つが課題となっている紹介を頂きました。私のような立場の人間から見ると、今後の KUR の廃炉のことも含めて非常に興味深いです。最初にセンターを構成される時は専任ではなくて、兼任で色々な先生方に入って頂き、その方々と上手く展開されているかと思いました。お伺いしたいのは、最初にセンターを立ち上げた時、専任と兼任の割合はどうされたのか？ それから今から思えばもう少しこうすればよかったとか、これで十分成功だったことを1つ教えていただければと思います。

渡邊： いわゆる大学の定員を使った専任教員は居ませんで、私自身も含め大学の定員内教員は全員兼務です。実は運営費もなく 100%外部資金でやっています。専任というと外部資金で雇用した特任教員のみになります。あと、何をもっとどうすればよかったか？と振り返って思ったことがなく、とにかく前を向いて自転車操業でやってまいりましたので、振り返る余裕もあまりなかった感じです。ひたすら色々な方々に助けて頂いた感謝だけです。

杉山： 先生のお力でネットワークを充実させたことが非常に大きいポイントであったということですね。ありがとうございます。他にありましたら Google Form にお寄せいただければと思います。渡邊先生、どうもありがとうございました。

8. 第四部／廃止措置に関する教育と研究、
良好事例の紹介

東京大学の取り組み（招待講演）

（東京大学） 齊藤 拓巳

廃止措置に関する教育と研究、 良好事例 (?) の紹介

東京大学の取り組み

齊藤拓巳

東京大学・大学院工学系研究科 原子力専攻



令和6年度京都大学複合原子力科学研究所将来計画短期研究会 2025.2.14

弥生の概要と廃止措置の進展

高速中性子源炉「弥生」

3



- ・ 炉型：ウラン燃料空気冷却型高速炉
- ・ 初臨界：1971年4月10日
- ・ 定格熱出力：2kW
- ・ 世界で唯一大学が所有して運転した研究用高速炉
- ・ 水系を一切使っていない**乾式炉心**を大気圧下で**空冷**しながら運転する方式
- ・ **中性子漏洩率制御方式**
- ・ **1炉心複数運転位置方式**
- ・ ガンマ線や熱中性子の混入の少ない高純度の高速中性子場が利用可能
- ・ **燃焼度が低く、燃料交換を必要とせず、供用中に使用済み燃料が生じない方式**
- ・ 遮へい、計測、崩壊熱等の研究、材料照射に関する基礎研究等に利用

原子炉本体設備に係る主要諸元

4

原子炉本体建設当時の写真 1/2

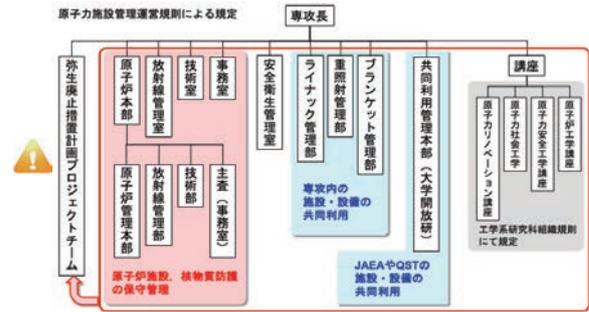
5

原子炉本体建設当時の写真 2/2

6

- 2011年3月 永久停止
- 2012年8月 廃止措置計画 承認
- 2013年3月 - 2019年10月 濃縮U燃料の切断作業
 - ▶ 被ばく管理を行いながら、ワイヤ放電加工機により燃料を小片化
 - ▶ 3段階からなる蒸留装置を用いることで、切粉の回収
- 2022年3月 濃縮U燃料の米国返還
 - ▶ 核燃料輸送船で荷出
 - ▶ 数多くのプレイヤーが関わる一大プロジェクト
- 2023年3月 日本原子力研究開発機構への輸送
- 2024年5月 廃止措置計画変更承認申請 廃止措置第2段階へ

廃止措置
第1段階



- 既存の組織はそのまま、廃止措置のための組織を被せている
 - ▶ 廃止措置の進展と共に、部をまたがる業務の増加、部の業務の多少が変化
 - ▶ セクショナリズムの弊害

燃料切断と米国変換

- ワイヤ放電加工機を用いた水中切断
- 内策での実施

- 輸送、廃止措置に詳しい専任の特任教員の配置
- 輸送をもっばらとする業者の助勢
- 訓練とリハーサル
 - ▶ 輸送容器への収納
 - ▶ 核物質防護システム性能訓練
 - ▶ 輸送における全ての関係者による総合訓練

- 予算確保
- 汚染状況の把握
 - ▶ 放射化計算 ← 運転履歴
 - ▶ サンプリングと非破壊γ線計測, 放射化学分析
 - 重・並コン, 鉄, 鉛
- 解体方法の検討
 - ▶ 時間, 人足
 - ▶ 汚染拡大防止
 - ▶ 労働安全対策
- 廃棄物管理方針
 - ▶ L3/CL/NRの発生量評価
 - ▶ 保管場所, 容量
 - ▶ CL申請準備

汚染状況の確認

- 運転履歴のデータベース化
- 放射化計算

- 評価の保守性の確認
- 廃棄物分類のための基礎データ
 - ▶ Key核種の選定
 - ▶ クリアランス判断

解体工法の検討

乾式/湿式コアドリルによる穿孔

乾式ワイヤーソーによる切断

廃棄物管理

弥生炉においても、L3相当廃棄物の大部分がクリアランス対象物

研究所等廃棄物の処分

原子力発電所以外の原子力の研究開発や放射線利用における放射性廃棄物の発生



○廃棄物発生事業者：約2,400事業所
 ・(国) 日本原子力研究開発機構が主要発生者
 ・その他は、独立行政法人、大学、公益法人、医療法人、地方自治体、民間企業

○昭和20年代から発生、累積している廃棄物量：約66万本(このうち、原子力機構は約37万本)
 (令和3年3月末時点。物量は200リットルドラム缶換算)

RI廃棄物(研究施設等廃棄物のうち、RIで汚染されたもの)は、日本アイントップ協会が集荷して処理をしているが、埋設施設がなく、保管を継続中

✓ 廃棄物受け入れ基準の整備
 ・ 廃棄体材料
 ・ 濃度限度
 ・ 持ち込めない(制限される)物質

✓ 特に、使用施設から発生する廃棄物は多様な性状を有しており、発生段階で安定化されていないものもある。

早急な埋設施設の整備が必要

原子力機構は、原子力機構の発生分のみならず、RI廃棄物を含めた研究施設等廃棄物の浅地中埋設事業を推進

第59回アイントップ・放射線研究発表会: https://www.jaea.go.jp/04/misetsu/info/pdf/aea2022_004.pdf

研究炉等の廃止措置におけるクリアランス適用

- 研究炉等廃棄物の搬出できず、長期間の廃棄物管理が想定されるため、原子炉本体の解体に着手できない

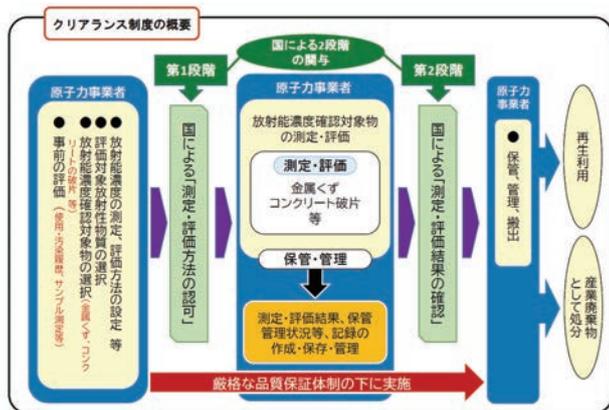
→ 廃止措置の停滞



- 低レベル廃棄物の大部分を占めるクリアランス対象物をクリアランス物とすることで、廃棄物管理のコストを低減させ、廃止措置を進められる。

- ▶ 廃棄物保管施設の確保、点検
 - ▶ クリアランス物のフリーリリース(再利用、産廃処分)はまだできない。*
 サイト内で非放射性廃棄物としての管理
- * 制度が定着するまでの間、事業者が自主的に搬出ルートを把握・業界内で再生利用

クリアランス制度



<https://www.encho.meti.go.jp/about/special/shared/img/qlq3-2fdt3tc.png>

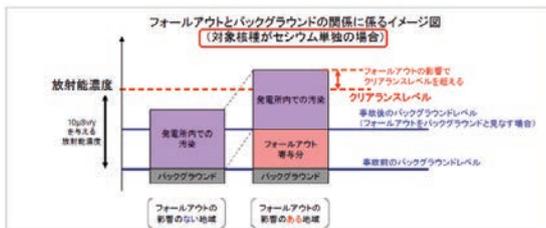
クリアランス実績

- https://www.nra.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/haiki4_jisseki.html
- 金属が大半
 - ▶ 二次汚染が中心 ← 汚染の範囲が明確
- コンクリートはJRR3のみ
 - ▶ 路盤材等の再利用先しか見込めないコンクリートは、電力では後回し。



https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/backend/backend_01_01_03.html

- 放射化汚染のみ
- コンクリートが中心（+鉄筋、鉛）
- L3/クリアランスに加え、クリアランス/NRの境界が重要



- 新たなガイドライン（原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に係るフォールアウトによる原子力施設における資材等の安全規制上の取り扱いについて」NISA-197c-12-1、平成24年3月30日）
 - ▶ バックグラウンドとしては扱わず、事故由来の放射性物質として規制・運用上の対象として考慮する。
 - ▶ クリアランス判断に当たっては、フォールアウトの影響も含めてクリアランス基準を満足していること。
 - ▶ NR制度適用に当たっては、事業者がフォールアウト影響の有無を判断する。実施方法は、保安規定に規定する。

- 多様な炉型と前例の少ないクリアランス対象物
 - ▶ 放射化されたコンクリート、鉛
- 小型炉であるため、クリアランス対象物の絶対量が少ない
 - ▶ コスト面からクリアランス適用に踏み切れない
 - 複数事業者間での連携（知見・経験の共有、監督官庁への予算要求、ステークホルダーへの働きかけ）
- 放射化の程度が実用炉と比べて小さいので、L3廃棄物の大半がクリアランス対象物になりえる
 - ▶ 放射化汚染（+二次汚染）

- 廃止措置に専らな組織体制
- 専従の教員の配置とリソースの集中
- 初期段階でのエンドステートの明確化
- 廃棄物の最小化とクリアランス制度の活用

第三部 廃止措置に関する教育と研究、良好事例の紹介 質疑応答

8. 東京大学の取り組み（招待講演） 齊藤 拓巳（東京大学）

杉山： 齊藤先生ありがとうございました。勉強になるお話が沢山あり、参考にさせていただくべく勉強させて頂きたいと思います。それではご質問をお受けします。

黒崎： 齊藤先生どうもありがとうございました。我々が聞きたかったことをくまなく見せて頂きました。私が質問するよりも三澤先生とか宇根崎先生が聞きたいことが沢山あると思いますので。私からはお礼のみで、質問は所内からお願いしたいと思いません。

三澤： KUR の廃止措置の申請書について今準備をしているところで、東大さんの経験を是非活かしたいと思います。クリアランスの制度をかなり活用されていることですが、手続き的に大変でしょうか？それとも割とスムーズにいくものでしょうか？

齊藤： まだ廃止措置の第二段階で、変更承認をかけています。認可されると原子炉の解体に着手できます。我々としては、一年後に最初のクリアランス申請をかける準備を進めていて、恐らくかなり大変だと思っています。原燃の敦賀は、何千トンも出して結局一割しか認められなく、正直大変だと思っています。特にコンクリートの経験が規制庁も無いので、JRR-3 での経験はあるのですが、新規制基準の前なので、新しいガイドに従った時にどうなるか、我々も手探りになります。

三澤： 承知しました。KUR の廃止措置としてはコンクリートが大量に出てくるのが想像できますので、それをどうするか検討していたところですが、先例の東大さんの情報をできれば色々教えて頂きたいと思います。よろしく願いいたします。

齊藤： そうですね。是非大学やほかの研究機関とネットワークを作って、我々と同じことを他の方にやって頂きたくはないので、2 回目からは楽になっていくはずなので、失敗事例も含めて共有できればいいなと思います。

宇根崎： 私からは技術的な面よりも、専従の教員と人的資源の集中が、非常に重要なポイントかと思うのですが、組織体系というか教員の配置の点で何かご苦労されたことがありましたら。例えば、専門的な知識を新たに配置したとか、実際的に廃炉措置のための組織として、線量評価とかを研究の講座とリンクさせているかなどをお聞かせいただければと思います。

齊藤： ご質問ありがとうございます。まず専従の特任の教員については、幸運にもハイセキュリティの輸送を手掛けた方を特任教授として迎えることができ、教員と同じ相当で入って頂きました。その方の下には輸送チームや解体のチームをつけ、その中には炉管と放管と技術さんが入っている。現状は、元々あった組織の上に廃止措置のプロジェクトチームが被せてありますが、実働はこちらで何とかうまく進められているので、やはりそういった人を置いた上で人と予算を実際に付ける。プロジェクトチームのリーダーは専攻長が行いますので、私が最終的な決を採りますが、やはり一点集中することは良いことだと思います。講座との連携は結構難しいのが実情です。我々も研究として出来れば良いしやりたい部分はありましたが、求められるスピード感や、廃止措置に規制との関係で時間がかかるので、対応がとりにくいことがありました。初期の頃は臨界のモニターをするための中性子計測をするとか、特に放射線管理とか、コンクリートの放射化を計算するためにコンクリートの組成を決めたりするのですが、そういったことは私の研究室がやっているの、分析や計測に長けたものがスポットで入る形が多いと認識しています。大学ですので、本来であれば研究ができれば良いとは思いますが、そこまでいきません。

宇根崎： ありがとうございます。

杉山： ありがとうございます。チャットにもご質問を頂いています。隅田様から「東海村にこうした廃炉工事を説明したのか」というご質問がありました。いかがですか？

齊藤： はい。我々は原子力施設ですので、東海村に関わらず隣接する自治体と協定を持っていきまして、協定の中でご説明申し上げています。基本的には廃止措置の変更承認をするタイミングで説明をすることになります。

杉山： 齊藤先生、本当にありがとうございました。

9. 第五部／全体討論

(京大複合研) 黒崎 健

第五部／全体討論

9. 全体討論

黒崎：皆様お疲れさまでした。ここから全体討論として進めさせて頂きたいと思います。Google Formに質問やコメントもいくつか頂き、それを共有しながら回答していきたいと思います。記名頂いた方、無記名で頂いた方など色々でしたが、ここではお名前ご所属等は全て除き、質問とコメントのみを共有させていただければと思います。全部で15～16件。途中でチャットに入ったものも拾えるものは拾っています。

私で回答できないところや、別の方がより正確に回答できる場所は、フォローをお願いしながら進めたいと思います。

○ 放射線取扱主任者はどれくらいいるか。養成の方針はあるか？

黒崎：あとで三澤先生にフォロー頂きたいですが、当研究所は放射線取扱主任者を第一第二という形で設けており、第一は特定教授の沖先生、第二が田中浩基先生と技術室の奥村さんをお願いして、3名体制でやっています。ただ、免状を持っている人は結構沢山いまして、いつでも対応できる状況です。養成の方針としては、それぞれの教職員が自分を自己研鑽するために頑張っていて、十分足りていますが、一方、我々は原子炉施設ですので炉主任も物凄く大事になります。これらに関して三澤先生からお願いします。

三澤：放射線取扱主任者の免状を持っている者は所内に30名程度おられます。原子炉主任技術者は、有資格者が4名で2つの原子炉に対応しています。今後は増やしていかなければと考えていますが、KURが廃止措置に入れば原子炉主任技術者の有資格者がなくても責任者になれるので、そのように対応するかと思います。

○ 論文は少ない話があったが、特許の申請・取得に関してはどうか。

○ 研究資材の物価高騰、電気代の高騰、人件費など研究に大きく関わる財源の問題に対して、運営費交付金が減少する中で、財源の多様化を考えていかなければならないと思います。特許収入や寄付金、企業との共同研究費、クラウドファンディングなど何かお考えのことはありますか。また複合研の特許取得の実績や現状分析はいかがでしょうか。(知的財産である「特許」という単語が出ていないので、業績としても軽視されているように感じました)

黒崎：特許については、正直所としてきちんと数えていませんが、京都大学の研究者データベースがありまして、そこにそれぞれ業績を登録します。知的財産権を記入するところがあり、私も記入していますので、それを集計し、他の部局と比べれば答え

が出ますが今は出来ていないというのが答えになります。実際に集計できていないので、複合研が多いか少ないか分かりません。産総研などは特許を重要視しますが、大学の研究所は、どちらかというと特許よりは論文を研究力の指標として重要視しますが、それが少ない。例えば非常に重要な特許を持っていて、その権利で自分の運営を賄うことができるといえる話だと思っておりますが、特許収入は色々あるのでしょうか、今の研究所ではそのようなものはないです。ただ運営費交付金は年々下がっている状況にありますので、我々も自分で研究費や運営費を上手く賄っていかないといけない。クラウドファンディングまではいかないですが、企業との共同研究をもっと増やして間接経費を増やす、あるいは共同利用・共同研究拠点で、全国の学術的なところと経費が掛からない形で連携していますが、その発展版として産業界から共同利用を受け入れ、対価としてお金を払って頂くなどの新しい試みが必要なのではと思っています。今こう思っているだけで、何か具体的に制度を設計しているわけではありません。

○ 回答は不要です。コメントのみ。

かつての附置研究所は、学部とは異なり、全国の大学で同じ名前のもは作らないという原則がありました。全国に一つの専門的研究機関であったわけです。特に戦後、全国共同利用という附置研究所ができるようになり、かつての原子炉実験所もその代表的なもので、大学関係の唯一の研究機関でした。

しかし、大学が法人化されてから、多くの大学が内向きになり、自分の大学のことしか考えなくなり、附置研究所も所属する大学のことを中心に考えて行動するようになってきていると思います。もちろん所属する大学との関係は重要なのですが、大学共同利用機関は装置の単なる共同「利用」ではなく、全国と同じ分野の研究者が共同「運営」という意識が重要です。

かつて一時的に KUR が止まっていた時、外国の研究炉を国内の研究者が利用できるようにする共同利用拠点として熊取が機能していたことがあったように思います。敦賀の新しい研究炉が使えるようになるまで、そのような役割を果たすことも、全国の研究者のために必要なことかと思っております。将来的には敦賀の研究炉が主要な研究施設ということになるのでしょうか。

加速器の利用も重要ですが、J-PARC や SPring-8 のような第一級のもをこれから熊取が作ることは無理でしょう。原子力の研究所としては、やはり核燃料を扱う施設での研究ができることが不可欠で、そのような研究者を育てることが大学の原子力の研究機関の役割だと思っております。将来原子力発電所が無くなっても人類は原子力・放射線とは無縁にはなれません。大学において原子力の基礎研究を続ける事は重要です。頑張ってください。

黒崎： 回答は不要でコメントのみと頂きましたが、非常に重要なコメントを頂いています

ので、この場で共有できればと思います。かつての附置研が唯一無二のもので同じ名前のもので無いという原則があったとか、大学関係で唯一の原子炉研究所だった話です。国立大学法人で言うと、今稼働中の原子炉は京大だけ、しかも2つ持っている。研究用原子炉を大事にしないといけない研究所だと思いますが、一年後にKURが止まるので、これからどうするかという話があります。かつて一時的にKURが止まった時の話もされておりまして、外国や他の研究機関との連携がその時の危機を救ったのでは？という話も頂きました。J-PARCやSPring-8級の施設をこれから熊取に作るの難しいけれど、うまく連携するのが大事じゃないか？最後に書かれている核燃料を扱うことができる施設、いわゆる非密封状態で使うことができる、RIもそうですが、ホットラボやトレーサー棟で使うことができるのは我々の強みになると思っていますので、将来計画の中でもホットラボ、トレーサー棟の話がでてきましたが、KURが停止しても残る部分と認識していて、強みを生かしていきたいと考えています。

- 研究所の将来や研究展開を考えると若手研究者の数や力も非常に重要になってくるかとおもいます。現在の複合研における若手研究者の割合についてや、若手研究者および学生のリクルートなどで取り組んでいることはありますか。

黒崎：正直に言いますと複合研の若手研究者の割合は低いです。京大の他部局と比べると低いと思います。大学として若手や女性の割合を大学全体として増やしていく方向性があり、その方向性に合う形で目標・計画を立て、それに対し実行できているかを常々聞かれています。若手や女性研究者を増やすことは共通認識としてあり、そのための活動は行っています。その一つが本日2名お話頂いた、若手研究者に自律的に研究をして頂くためのフロンティア研究プロジェクトを上手く使う。本学が定める数値目標に対し我々の活動が間に合っていないところもありますので、若手をもっと増やしていかないといけないところがあります。人事の話もありますので、そう簡単にすぐできることでもなく、少しずつ前に進んでいる状況です。次に学生のリクルート。これも非常に重要で、中島先生が「原子力最大限活用で人材育成も」とコメントでされていて、原子力人材育成を国として力を入れようとしているところです。そうすると、次を担う学生さんにきちんと原子力や放射線のことを学んで頂く、あるいは周辺のサイエンスを勉強してもらうことが重要になってきます。我々の研究所は京都大学の研究所ですが場所が熊取町にあり、本学は京都市内の吉田キャンパスで、工学研究科は桂キャンパスで場所が離れているので学生さんからするとハードルが高くなる訳です。なので研究所としてはリクルート活動をきちんとやらないといけないのですが、唯一1つ出来ていることを挙げるとすれば、京大の1回生に対する共通教育的な講義の1つに「人類と放射線」を提供しています。その講義を取ってくれたら、研究所の見学に来てもらうことはやっていますが、そ

の程度です。

○ HEU を使用している近代炉も 2026 年度までしか運転できないのでしょうか？

黒崎：これは近畿大学さんの話で私が答えて良いかわかりませんが、2026 年度までしか運転できないということはないと思います。近大炉も低濃縮化に向けて動こうとしていまして、低濃縮化後は低濃縮燃料で動く聞いています。具体的にいつとは言えないですが、近大炉についても燃料を低濃縮化した後も運転を継続する話を聞いていることは共有しておきます。超重元素や医療用 RI は専門的すぎるので回答を控えさせていただきます。

○ 将来計画の実現には問題点と方向性が整理されています。これから問題解決及び計画の実現するため、具体的にどのような行動をとっていますか教えてください。

黒崎：これは非常に難しいです。今は、計画を立てようとしているところで、杉山先生から理念や哲学の話を紹介頂きました。一方、計画を実現するために組織を見直さないといけないと思っています。今まで KUR が研究所の中心にドンとあったものが運転停止になることは、本当に大きな転換点です。当然 KUR が動いている時と停止した後では研究所の組織もそれに見合った形にしないといけないというのが私の考えです。KUR が運転停止した後の研究所の組織について現在検討を進めています。これは個別の話ではなく大きな全体のことです。KUR の運転は令和 8 年の 5 月が運転の期限になっていて、令和 8 年度は KUR が動いていることになる。次の令和 9 年 4 月から新たな体制で複合原子力科学研究所の組織を整うべく検討しています。これもそんな簡単な話ではなく、京都大学全体の中での我々の位置づけや、大学の意向もありますので、本学の関係者とも相談しながら整えていきます。個別ではなく、京都大学全体の大きな話ですがこのようなことをやっています。

○ 京都大学の国際卓越研究大学認定に向けた取組における複合研の位置づけ、あるいは複合研への影響について教えてください。

黒崎：国際卓越は、京大の全体の話になります。国際卓越研究大学の制度は、通常の運営費とは別にそれなりの予算が大学に配分され、その予算で本当に国際的に卓越する研究大学になるよう 20 年～30 年かけて大学を変えていくという制度です。京都大学もそれに選ばれるよう頑張っているところです。仮に選ばれたときに複合研はどうなるかという話は、内部の話なのでどこまで言えるか非常に難しいですが、大学の執行部から我々がどう見られているかが 1 つポイントになるかと思います。総長やプロボストという方々とは常に情報共有をしていて、活動や取組み、実情を良く知って頂いています。国際卓越研究大学になったら複合研が全学の大きな波にのま

れててしまう、とかそういうことは直ぐには起きないのでは？ と今現在では思っています。あくまで認定されてからの話だということ。その全学的な取り組みにおいて複合研が何かしているかと言うと、あまり関わってないというのが実情です。

- KUR の停止後、現在と比べてどの程度の比率の共同利用件数を維持することを目指すべきか。

黒崎： 今、年間 300 件弱程の共同利用・共同研究を受け入れています。人数としては延べ 3000 人超位の人が毎年複合研を訪れています。その中で KUR を使っている人は、ざっくり 6~7 割位と理解していて、その 6~7 割位の人が KUR 停止後どこに行くか。これはそれぞれの共同利用の事情によるケースバイケースで、全ての人がここに来なくなるかと言うと、そうではなく、部分的な活用をするために共同利用という形で来所される方もおられるでしょうし、当然全く来なくなる方もおられると思います。このあたりはもう少し詳しく見ていかないといけないと思っています。もう 1 つは本日、田中先生に代替中性子源の話をして頂きましたが、サイクロトロン加速器が重要な施設なのですが、サイクロトロン加速器を使って、KUR で行っていた生物照射に関するところを中心に受け持つことができないか？と考えています。そのためにサイクロの稼働時間を週 5 時間から週 20 時間にすることも計画していますが、そのあたりを上手くやりながら今の 300 件弱をできるだけ維持することを考えていきたいと思っています。共同利用・共同研究拠点には、国際枠のような話があります。通常の拠点よりもワンランク上の拠点であり、京大では化学研究所や、最近では基礎物理学研究所が拠点としてランクアップしたそうです。複合研がいきなり国際枠にランクアップできるのかと言うと、これまでを見ても難しいと思いますが、そういったことを目指しながら国際的な拠点になるために、まずは国際共同研究という形で新たな共同研究を立ち上げながら、減った件数をカバーすることも考えています。今現在少し制度設計しているところです。

- 京大の研究 PR のために動画とかキッズコーナーとかの試みはないか？原子力学会は「あとみる」という動画を作っている。

黒崎： 複合研も広報が非常に大事だと思っていまして、京大全体でもやっていますが、複合研としてもきちんと広報をしないといけないと考えています。今までも活動しています。例えば広報誌「アトムサイエンスくまとり」を年 2 回出していて、この 4 月にも一般公開・桜公開として一般の方に気軽に来て頂く。月 1 回の施設見学会、周辺の中学生に実験教室を開催するなど色々な活動をしています。ここに書かれているようにもっと魅力を向上させるために研究所内で広報をする部署を作り、より力を入れながら活動しています。

- 杉山先生のお話を受けての質問です。将来構想がだんだん見えて来て、期待しているところですが、原子炉が無くなると、やはり複合研の共共拠点としての位置づけが、見えにくくなります。集合から複合というのは、良いキャッチフレーズですが、研究所としてはいいかも知れませんが、共共拠点としては少しユーザーになりにくい感じを受けます。もっと一般の研究者に伝わる研究所の方向が示せばいいかと、、、いいプランディングが必要かと思いますが、如何でしょうか。

また、おそらくユーザーはかなり減ると思われませんが、新研究炉はかなり先の話ですが、しっかり新研究炉に繋がる道筋を見せること、他機関との連携では JAEA の原子炉の共共拠点としての利用のバスの、早くしっかり見えるようにして、ユーザーをつないでおくことも必要かと思えます。

やはり大きなミッションは、普通の大学では対応が難しくなっている、核燃や RI、放射線に関連する教育です。放っておくとどんどん大学でこの種の教育が弱くなるので、教育面で積極的にサポート、こちらからプッシュするような施策が必要かと思っています。教育する人材も大学では減っているのも、このことはかなり分野全体として深刻な問題です。人材育成と教育の拠点という観点でも、所長のお考えをお聞かせいただければと思います。

もう一件、少し気になる点ですが、共共拠点として、他との差別化をもう少し強くうまくできると良いかと思えます。加速器も特に大きいわけではなく、HL 等も他にもあるので、何をアピールしてユーザーになってもらうか。個々には進められているとは思いますが、将来構想も含め、ユーザーや関連コミュニティとの情報交換やWSなどを通じ、連携強化も一層必要かと思えます。

杉山： 真ん中のところは どちらかという RI や放射線教育の部分で所長がお答え頂いた中に入っているかと思えますので、一番上の部分と下の部分。これは共共拠点に関わりますので少し併せた形で回答させて頂きたいと思えます。現状の意見や考え方を述べることにしたいと思います。この質問を頂いたとき、まず率直に申し上げて「そうか」と。この質問では「集合から複合」は良いキャッチフレーズとお褒め頂いています。研究所としては良いかもしれないが、共共拠点としては少しなりにくい感じを受けるといってご指摘を頂いています。私は分析の中で複合を目指しているけど、単純に集まっているだけという要素が研究所自体に見えているのでは？と。本当に融合した形・・・BNCT のように持っていないといけない、もっと作らないといけないという思いが強かったのでこのようにお話しましたが、それはここでご指摘頂いた通り所内の内部の話で、それが共共拠点のユーザーとしてどうなるかと言われると、全く持ってご指摘のとおり。なので私が思うところとしましては、集合から複合、そして複合原子力科学をなるべく早い段階で確立というか、過程も含めてになります。外のユーザーにどのようなものが提供できるか。また過程で色々な方々にお声をかけて頂き一緒にやっていくこともあると思えますので、その辺をこ

れから将来計画で出していないといけないと強く思った次第です。複合原子力科学を外のユーザーにどう出していくか、使って頂くかをしっかり考えないといけないなど。そういうことによって一般の研究者の方に伝わる研究所の報告書が出せれば良いかなと思っています。非常にありがたいご指摘ありがとうございます。

他機関との連携の話も共共拠点は大事なことです。新試験研究炉に関しては、京大、JAEA、福井大学で既に各所が結ばれています。我々の中でも共共拠点として繋がるものとして、外部利用とか新試験研究炉も踏まえた上で外の施設との連携が非常に大事だと更に思っています。現在そのための準備として既に活動を始めています。近いうちに他機関と MOU を結んでこれから新試験研究炉に繋がるような研究、更に共共拠点として連携できるよう持っていければと思いつながり活動をさせて頂いています。現時点では完全にオープンに出来るようなものではないので、活動していることだけでお許しいただければと思います。

その外との連携の話をした後、再び内部の話に戻りますが、中に何かあるかを外部の関連コミュニティ、ユーザーとの情報交換は大事だと。これは身に染みています。しっかりやっていきたいなと思っています。

○ MKB の全体計画において、Ph.1 の成果は何で、Ph.2 の目標成果は何か教えてください。

杉山： フェーズ 1、2 は研究所の現状分析。この次に向かうためには何をしなければいけないのかを考えていくための礎をつくりたい。フェーズ 1 は非常に大きな礎で「そもそも今まで何をやってきた研究所なのか」そして「これからそれを活かして何をやっていくべきか」の大きな枠組み、哲学を考えたい。フェーズ 2 は、それを所内の施設やサイエンスに分解して落とした時に何があり、何が出来るかを考えていきたい。最後に図を書かせて頂きましたけど、こういうところまで持っていく。これからフェーズ 3 に入る段階では本当に将来計画を立てていくことになります。全体の哲学が何で、それをするために何を持っているか。それはサイエンスだけではなく、施設も両方ありますので、それを融合させていく将来計画を考えていきたい。繰り返しますが、それが内部だけの話にならないよう外部と連携していきたい。

○ フロンティア研究が人類に（の健康）にどう役立つのか、教えてください。

杉山： フロンティア研究のお話ですが、2つのタンパク質に関する話をさせていただきました。最初のタンパク質のお話は色々なところに存在するタンパク質で、我々の生活の基本になってきます。コンフィデンシャルなこともありますので、あまり言えないですが、上手くすると認知症関係の話にも繋がってくるのではというデータも見えていることもあります。

慈幸先生の研究は人間が活動するためのエネルギーがどうやって出来ているの

か。ここが壊れると間違いなく病気になる。すぐに創薬に直接結びつくわけでもありませんが、現在は原点の研究をしている。これが無いと、次に新たな薬を作る時どうすればいいかに結びつかない。人間の健康において非常に大事なキーポイントに立つ生命活動に関するタンパク質の研究をしているとご理解いただけると嬉しいです。

- ライナックやサイクロトロンの今後の活用のために経費と人員の確保が必要となるが、その見通し、あるいは方策をどのように考えているか

三澤： ライナック、サイクロトロンの予算、人材確保ですが、田中先生の発表にもありましたとおり、ライナックの人員不足は、切実な問題だと考えています。KURの停止以降はKURに関係しておられた技術職員の方等をライナックやサイクロロンに移すことが一番現実的だと思います。KURの廃止措置に入るまでには2年～3年先になりますので、それ以降に少しずつとなるとと思いますが、KURの廃止措置と併せて人材確保を検討しなければいけないのですが、現在しっかりとしたアイデアはありません。ライナック、サイクロトロンの重要性はしっかりと認識しているところでございます。

- 宇根崎先生のご講演でKUCAの活動について紹介され、その中で、原子力専攻の学生さんや原子力関係の仕事に従事されている社会人のお話があったかと思いますが、それ以外の学生さんや社会人を対象に、近畿大学で行われているような原子力に対する理解促進を目的とした実験教育についてはどのようにお考えでしょうか？

三澤： 現在KUCAは低濃縮化を行っておりまして、完了までに3年程かかります。今現在KUCAのスタッフはその作業で手一杯で、それ以降は大学院生実験をメインにしていきます。大学院生実験で手一杯なところがあり、社会人などはもう少し先と考えています。最近、発電炉やメーカーの方と人材育成についてディスカッションする機会があり、KUCAでの炉物理実験には大変興味を持って頂いておりましたので、そういうところに上手く展開出来れば役に立つのではと思います、今後の課題ということしたいと思います。ご指摘ありがとうございます。

黒崎： ありがとうございます。

10. 開会挨拶

(京大複合研) 杉山 正明

閉会挨拶

まずは何より朝早くから長い間ご参加いただき、ありがとうございました。特に所外からご講演頂いた先生からは、非常に勉強になる話を頂きました。またチャット、その他 Google Form にご質問頂いたことも本当に勉強になりました。まだ目が届かないところをご指摘頂き深く感謝しております。

最後に、全体を俯瞰して1つだけ申し上げると、研究活動も頑張る。KUR が停止した後もここで出来る装置や施設もあり、教育研究ある話をさせて頂きました。では KUR はどう？廃止措置もある。今回色々勉強になるお話を頂いたことで、大変実のある将来短期研究会にすることができました。この研究会は来年度もありますし、黒崎所長を筆頭に私達全員で複合原子力科学の旗印のもと、これからより良い研究所を目指していきたいと思えますので、ご支援・ご鞭撻等々をよろしく願いいたします。

本日は長い間 どうもありがとうございました。

京都大学複合原子力科学研究所

副所長（研究教育担当）

杉山 正明

令和6年度京都大学複合原子力科学研究所将来計画短期研究会
プログラム

日 時：2025年2月14日（金） 10:30-17:00

開催場所：オンライン

10:30-	開会あいさつ	三澤
-10:40	研究所の近況報告、本日の内容・ねらいの紹介	黒崎
第一部	研究所の将来計画	
10:40-11:20	MKB 委員会での議論	杉山
第二部	活躍するフロンティア研究者	
11:20-11:45	フロンティア研究プロジェクトでの研究進展	奥田
11:45-12:10	フロンティア研究プロジェクトでの研究進展	慈幸
第三部	KUR に頼らない教育と研究、複合研での展望	
13:30-14:05	多彩な加速器施設を使った教育と研究	田中
14:05-14:40	KUCA の燃料低濃縮化と将来計画	宇根崎
第四部	廃止措置に関する教育と研究、良好事例の紹介	
14:40-15:25	東北大学の取り組み（招待講演）	渡邊（東北大）
15:25-16:10	東京大学の取り組み（招待講演）	斉藤（東大）
第五部	全体討論	
16:10-16:55	会場からの質問に所長が回答する	黒崎
16:55-17:00	閉会あいさつ	杉山

司会：三澤（午前）、杉山（午後）

令和 6 年度
京都大学複合原子力科学研究所
将来計画短期研究会 報告書
(令和 7 年 3 月発行)

発行所 京都大学複合原子力科学研究所
大阪府泉南郡熊取町朝代西二丁目
TEL 072-451-2300