



原研・大学プロジェクト共同研究  
シンポジウム報告書  
「核燃料サイクルにおけるバックエンド化学」  
と「放射線高度利用研究」  
— 第4期プロジェクト共同研究の成果と今後の展開 —  
2003年2月18日 東京大学 山上会館

2003年11月

原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会  
原研施設利用共同研究委員会

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

原研・大学プロジェクト共同研究  
シンポジウム報告書

「核燃料サイクルにおけるバックエンド化学」と「放射線高度利用研究」  
－第4期プロジェクト共同研究の成果と今後の展開－

2003年2月18日 東京大学 山上会館

日本原子力研究所  
原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会

東京大学原子力研究総合センター  
原研施設利用共同研究委員会\*

(2003年8月11日受理)

本報告は、平成15年2月18日、東大において開催された「原研・大学プロジェクト共同研究シンポジウム－第4期プロジェクト共同研究の成果と今後の展開－」をまとめたものである。バックエンド化学及び放射線高度利用の2つのプロジェクトよりなる原研・大学プロジェクト共同研究は15年度をもって終了することから、第4期プロジェクト共同研究についての成果を発表するとともに、これまでの本プロジェクト共同研究の活動をふりかえり、今後の連携の効果的な方策について意見交換を行うために開催された。

バックエンド化学及び放射線高度利用の2つのプロジェクトの目的、各テーマ毎の成果、今後の研究展開が報告された。バックエンド化学の総括では、再処理と廃棄物処分の分野で原研と大学が「プロジェクト」として協力して取り組むことによって、単独では成し得ない成果を挙げたことが報告された。また、放射線高度利用の分野では、T I A R Aを用いた独創的な研究が進められ、人材育成を含めて多くの成果が得られたことが報告された。さらに、パネル討論では、原研・大学プロジェクト共同研究を通して得られた経験と実績を生かし、今後の新たな連携方策を探ることの重要性が強調された。

---

日本原子力研究所：〒277-0842 千葉県柏市末広町14-1

\*東京大学原子力研究総合センター：東京都文京区弥生2-11-16

Proceedings of the Symposium on the Joint Research Project  
between JAERI and Universities  
"Backend Chemistry for Fuel Cycle" and "Advanced Radiation Application Research"  
- Results of the 4th Phase Joint Research Project and the Future Plan-  
February 18, 2003, The University of Tokyo, Sanjyo Hall

Committee for the Joint Research Project between JAERI and Universities

Japan Atomic Energy Research Institute  
Suehiro-cyo, Kashiwa-shi, Chiba-ken

and

Committee for the Universities' JAERI Collaborative Research

The University of Tokyo  
Research Center for Nuclear Science and Technology  
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received August 11, 2003)

The present report describes the Proceedings of the Symposium on the Joint Research Project between JAERI and Universities -- Results of the 4th Phase Joint Research Project and the Future Plan --, held at the University of Tokyo on February 18, 2003. The joint research project composed of the backend chemistry project and the advanced radiation application project was to be concluded in the end of March 2003. Hence the symposium was held in order to review the results obtained in the 4th phase project and to exchange ideas on the effective measures for the future joint collaboration in view of the past activities.

The purpose, results in each research item, and the future plan of both the backend chemistry project and the advanced radiation application project were reported. In the overview of the backend chemistry project, it was reported that synergistic results on the reprocessing and the treatment of radioactive waste had been obtained, which could not be obtained independently. In the overview of the advanced radiation application project, it was reported that unique researches using TIARA had been conducted and many results including the personnel training had been attained. In the panel discussion, importance of pursuing a new effective measure for the future joint research was emphasized in view of the experience and achievement obtained in the course of the JAERI/Universities Joint Research project.

**Keywords:** Joint Research Project, Backend Chemistry, Actinides Research, Advanced Radiation Application, TIARA

## 目 次

1. はじめに	1
中沢正治（原研施設利用共同研究委員会委員長、東大）	
2. 研究成果報告	
2.1 バックエンド化学 第4期研究成果のまとめ	
2.1.1 バックエンド化学第4期研究のねらい	2
館盛勝一（原研）	
2.1.2 アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質	4
篠原伸夫（原研）	
2.1.3 アクチノイド元素の固体化学と燃料工学の研究	8
中村彰夫（原研）	
2.1.4 アクチノイド元素の溶液化学と分離分析技術	11
－アクチノイドの電気化学的基礎物性－	
木原壮林（京都工芸繊維大）	
2.1.5 廃棄物処分と環境化学	14
長崎晋也（東大）	
2.1.6 成果の総括と今後の研究展開	17
田中知（東大）	
2.2 放射線高度利用 第4期研究成果のまとめ	
2.2.1 放射線高度利用第4期研究のねらい	20
河出清（名大）	
2.2.2 陽子加速器施設における放射線安全に関する研究	21
－高エネルギー中性子モニタ用検出器の開発－	
山口恭弘（原研）	
2.2.3 材料照射損傷に対する核変換生成物の影響に関する研究	29
實川資朗（原研）	
2.2.4 劣化環境下における植物の養分吸収機構の研究	45
森敏（東大）	
2.2.5 大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用	57
石井慶造（東北大）	
2.2.6 第4期研究の総括と今後の展開	77
河出清（名大）	
3. パネルディスカッション	79
大学・原研プロジェクト共同研究の成果と今後の連携の効果的な方策について	
座長 河出清（名大）	
パネリスト	
3.1 バックエンド化学研究（1～4期）の総括	
田中知（東大）	79
3.2 「融合研究」としてのバックエンド化学研究の構築	
藤根幸雄（原研）	

3. 3 放射線高度利用研究（1～4期）の総括 渡辺 宏(原研) . . . . .	83
3. 4 マイクロ PIXE 分析プロジェクトの今後の展開 石井慶造(東北大) . . . . .	85
3. 5 連携重点研究のねらい(大学の視点から) 伊藤泰男(東大) . . . . .	87
3. 6 連携の今後の展開 渡辺博正(原研) . . . . .	91
3. 7 議論のまとめ . . . . .	92
4. 閉会挨拶 . . . . .	95
岩本 昭 (原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会委員長、原研)	
付録1 シンポジウムプログラム . . . . .	97
付録2 委員会名簿 . . . . .	99

## Contents

1.	Opening Address . . . . .	1
	Masaharu NAKAZAWA (Chairman of the Committee for the Universities' JAERI Collaborative Research, The University of Tokyo)	
2.	Reports on the Results of the Joint Programs	
2.1	Backend Chemistry Project -- Summary Results of the Fourth Period --	
2.1.1	Purpose of the Fourth Phase Backend Chemistry Project . . . . .	2
	Syoichi TACHIMORI (JAERI)	
2.1.2	Nuclear-chemistry and Physical-chemistry Properties of Actinides . . . . .	4
	Nobuo SHINOHARA (JAERI)	
2.1.3	Solid State Chemistry and Nuclear Fuel Engineering of Actinides . . . . .	8
	Akio NAKAMURA (JAERI)	
2.1.4	Solution Chemistry and Technologies for Separation and Analysis of Actinides -- Electrochemical Data on Actinide Ions -- . . . . .	11
	Sorin KIHARA (Kyoto Institute of Technology)	
2.1.5	Treatment of Radioactive Waste and Environmental Chemistry . . . . .	14
	Shinya NAGASAKI (The University of Tokyo)	
2.1.6	Overview of the Results and Future Research Plan . . . . .	17
	Satoru TANAKA (The University of Tokyo)	
2.2	Advanced Radiation Application Project -- Summary Results of the Fourth Period --	
2.2.1	Purpose of the Fourth Advanced Radiation Application Project . . . . .	20
	Kiyoshi KAWADE (Nagoya University)	
2.2.2	Research on Radiation Safety of a Proton Accelerator Facility . . . . .	21
	-- Development of a Detector for High Energy Neutron Monitor --	
	Tomohiro YAMAGUCHI (JAERI)	
2.2.3	Effects of Transmutation Products on Radiation Damage in Fusion Reactor Materials . . . . .	29
	Shiro JITSUKAWA (JAERI)	
2.2.4	Research on Nutrients Uptake Mechanism of Plants in a Sterile Environment . . . . .	45
	Satoshi MORI (The University of Tokyo)	
2.2.5	Development of In-air Micro-PIXE Analysis System and its Application . . . . .	57
	Keizo ISHII (Tohoku University)	
2.2.6	Overview of the Results and Future Research Plan . . . . .	77
	Kiyoshi KAWADE (Nagoya University)	
3.	Panel Discussion . . . . .	79
	Results of the Joint Research Project between JAERI and Universities and Effective Measures for the Future Joint Collaboration	

Chairman : Kiyoshi KAWADE (Nagoya University)

### **Panelist :**

3.1	Overview of the Backend Chemistry Project (Phase 1 - 4) · · · · ·	79
	Satoru TANAKA (The University of Tokyo)	
3.2	Construction of the Backend Chemistry Project as a "Unified Research" · · · · ·	82
	Yukio FUJINE (JAERI)	
3.3	Overview of the Advanced Radiation Application Project(Phase1 - 4) · · · ·	83
	Hiroshi WATANABE (JAERI)	
3.4	Future Plan of the Micro-PIXE Analysis Project · · · · ·	85
	Keizo ISHII (Tohoku University)	
3.5	Purpose of the Collaborative Priority Research (from the Viewpoint of Universities) · · · · ·	87
	Yasuo ITOH (The University of Tokyo)	
3.6	Future Plan for the Joint Collaboration · · · · ·	91
	Hiromasa WATANABE (JAERI)	
3.7	Summary of Discussion · · · · ·	92
4.	Closing Remarks · · · · ·	95
	Akira IWAMOTO (Chairman of the Consultative Committee for the JAERI /Universities Joint Research Project, JAERI)	
Appendix1	Symposium Program · · · · ·	97
Appendix2	Committee Member List · · · · ·	99

## 1.はじめに

原研施設利用共同研究委員会委員長、東大 中沢正治

本日の第4回原研・大学プロジェクト共同研究シンポジウムは、プロジェクト共同研究を締めくくる最後の報告会である。原研と大学のいずれの組織も新しく衣替えして、新しいスタイルで21世紀を迎えようとしている。J.J.統合と言われている核燃料サイクル機構と原研の統合があり、また大学自身も独立行政法人化という過程にあり、ここで今までのシステムを終了して、新しい連携のスタイルを模索すべき時期に至ったと言える。来年度の4月になると状況はもう少しはっきりしてくるのではないかと思うが、本日のシンポジウムでの議論も、これから対処に資していきたいと思っている。

## 2. 研究成果報告

### 2.1 バックエンド化学 第4期研究成果のまとめ

#### 2.1.1 バックエンド化学第4期研究のねらい

原研東海 館盛 勝一

原研・大学プロジェクト共同研究「バックエンド化学研究」は、第3期の後半から第4期研究の必要性に関する議論が提起され、過去13年間における成果の評価や制度のあり方が真剣に議論された（日本原子力学会誌、Vol. 41, No.10の特集記事を参照）。そして「第4期研究」は平成11年から13年度迄の3年間に限るということで実施された。

バックエンド化学第4期研究の「ねらい」を二つの観点から述べてみたい。その第一は研究課題であり、時代のニーズに合っており 焦点を絞った研究課題という観点から、アクチノイドの化学を前面に出した4分野が選ばれた。バックエンド化学の特徴はそのすそ野の広さと基礎研究充実の必要性にあり、その背景となる元素はアクチノイドと云っても過言ではない。1) アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質、2) アクチノイド元素の固体化学と燃料化学、3) アクチノイド元素の溶液化学と分離分析化学、4) 廃棄物処分と環境科学、という4つの代表分野は、我が国原子力界の要請に十分応えた選択であった。

第二の観点は、プロジェクト共同研究というシステムの方法論的有効性を示すことである。即ち、上記研究課題を「プロジェクト共同研究」という枠組みを利用して行うと、どれだけより良質な成果が得られるのかを実証する事である。この課題は、上述の経緯と共に、原子力分野における低迷、省庁再編、そして各種の公募型研究制度の乱立といった新たな外部情勢の中で、このシステムに参加している人達全てに科せられた荷であった。

私はこの課題に応えるには次の視点が重要と考えている。即ち、研究活動を「新たな知識の創造」と「その応用面の展開」と位置付けると、前者においては、1) 創造すべきより重要で本質的知識を選別することと、2) 得られた知識をより高度な知識に止揚することが重要である。また後者においては、3) 独創的アイデアや4) 実際に役立つことが重要である。

ところで、私が従来耳にしていた原研と大学との協力の必要性は、主として有用施設（原研）と人的資源（大学）との結合効果、換言すれば5) 研究資源の有効利用に重点を置くものであり、上記の要素1)～4)の観点は議論されてこなかった。しかし、5) の意義は一般的な共同研究や協力研究にも共通であり、プロジェクト共同研究に特異的なことではない。プロジェクト共同研究の特徴は、構成する研究グループの数の多さとその多様性（専門性、目的意識）にある。この特徴が1)～5)の要素の効率的追求と共鳴する（協同効果）という点に私は注目している。例えば、研究成果としての学位論文や学術論文は、1)～4)の観点から内容をもっと評価すべきであろう。

一方、この協同効果を最大限に引き出すためには、構成員の間の不断の議論・意思疎通が不可欠である。そのため、プロジェクト共同研究というシステムには、不十分ではあるが各種ワークショップや会合を持つための予算措置がとられている。

既に終了している研究プロジェクト（即ちその成果も解っている）の「ねらい」をここで述べてきたが、シンポジウムにおける討論の参考になることを願っている。

主な質疑応答

本共同研究における“プロジェクト”としての意義、およびアクチノイド化学の重要性を強調して、第4期研究成果の概要が説明された。

## 2.1.2 アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質

原研東海 篠原 伸夫

### 1. バックエンド化学共同研究における核化学研究の経緯

“原子力発電を定着させ、原子力を自立的なエネルギー源とするためには、核燃料サイクルを確立する必要がある。しかし、そのバックエンドには再処理、廃棄物処理などの分野においてなお一層の信頼性を向上させる必要があり、それはまた大きな社会的要請の一つとなっている。このためには、その技術の基盤となる基礎研究を充実させる必要があるが、欧米の原子力先進国に比べ、著しく遅れているのが現状である。このような現状から脱却し、バックエンド技術の基礎研究を充実して社会的要請に応えるためには、早急に原研・大学などの関係者の英知を集約し、努力を重ね、一致協力して組織的な基礎研究を推進することが必要である。”これは昭和60年度バックエンド化学研究専門部会報告の趣旨であり、この下に、(i) アクチノイドの化学的研究、(ii) 再処理プロセスの改良、高度化の基礎研究、(iii) 廃棄物プロセスの改良、高度化と安全性評価の基盤研究、が開始した。核化学研究は(i)の分野に関連して、主に原研タンデム加速器を利用して実験が進められた。アクチノイドの核化学研究として、大学の研究者と共同でオンライン質量分離装置や迅速化学分離装置の開発・応用研究を行い、日本で初めて100番元素<sup>250</sup>Fmの合成に成功した。これらの研究成果は研究の基盤として生かされ、本共同研究の第4期研究に大いに役立っている。

### 2. 第4期研究成果（トピックス）

第4期バックエンド化学共同研究の分類テーマ「アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質」の下に、(i) 中性子不足アクチノイド核種の探索と壊変アクチノイド核種（特にAm核種）の同定とその壊変特性の研究を実施し、Am核種（<sup>233</sup>Am、<sup>234</sup>Am、<sup>235</sup>Am、<sup>236</sup>Am）のみならずCm核種（<sup>237</sup>Cm、<sup>238</sup>Cm）の同定に成功して、 $\alpha$ /EC壊変に関する詳細な核データを得た。図1に新核種<sup>233</sup>Amの $\alpha$ 壊変連鎖と測定した $\alpha$ 線スペクトルを示す。(ii) アクチノイドの陽子、Li誘起核反応によって生成する不安定核を対象に $\beta$ / $\gamma$ 壊変核分光学的研究を進め、ランタノイド核種（<sup>158</sup>Pm、<sup>159</sup>Pm、<sup>159</sup>Sm、<sup>162</sup>Sm、<sup>166</sup>Gd、<sup>166</sup>Tb）について詳細な半減期、これまで報告のなかった崩壊に伴う $\gamma$ 線データおよび $\beta$ 線の最大エネルギーの測定に成功している。また、(iii) 重・超アクチノイド元素を気相中で迅速に化学分離し、その分離挙動を通して重元素の電子構造に関する情報を得ることを目的として、104番ラザホージウム(Rf)の同族元素であるZrならびにHfの揮発性塩化物錯体MCl<sub>4</sub>の生成およびその揮発性について等温クロマトグラフ法を用いて検討した。ZrならびにHfの塩化効率や石英カラムに対する吸着エンタルピー等が得られており、今後の超アクチノイド元素の化学挙動に関する研究の進展が期待される。

これらの研究成果の一部は本シンポジウムで報告する。また、具体的な全ての研究内容・成果は共同研究成果報告書(JAERI-Review 2003-001)として刊行されるので参考されたい。

### 3. 今後の核化学研究の展開

本プロジェクト共同研究により、世界の先端研究に肩を並べる力を得て、しかも世界の先端に位置する成果が得られたことは原研・大学関係者の努力によるところが大きい。本研究テー

マを更に発展させ、安定領域から遠く離れた核種や超アクチノイド元素の核的性質および化学的性質を研究することにより、極限領域での原子核の性質や周期律に関する新しい知見が得られると期待される。これらは学問的に意義があるだけではなく、加速器駆動型未臨界炉などの将来の核燃料サイクルに不可欠な基礎データとして貢献できるとともに、将来の原子力を支える基礎情報として極めて重要である。また、研究を通して原子力研究者の育成に大いに寄与したものも特筆すべきであると考える。

### 新核種 $^{233}\text{Am}$ の同定

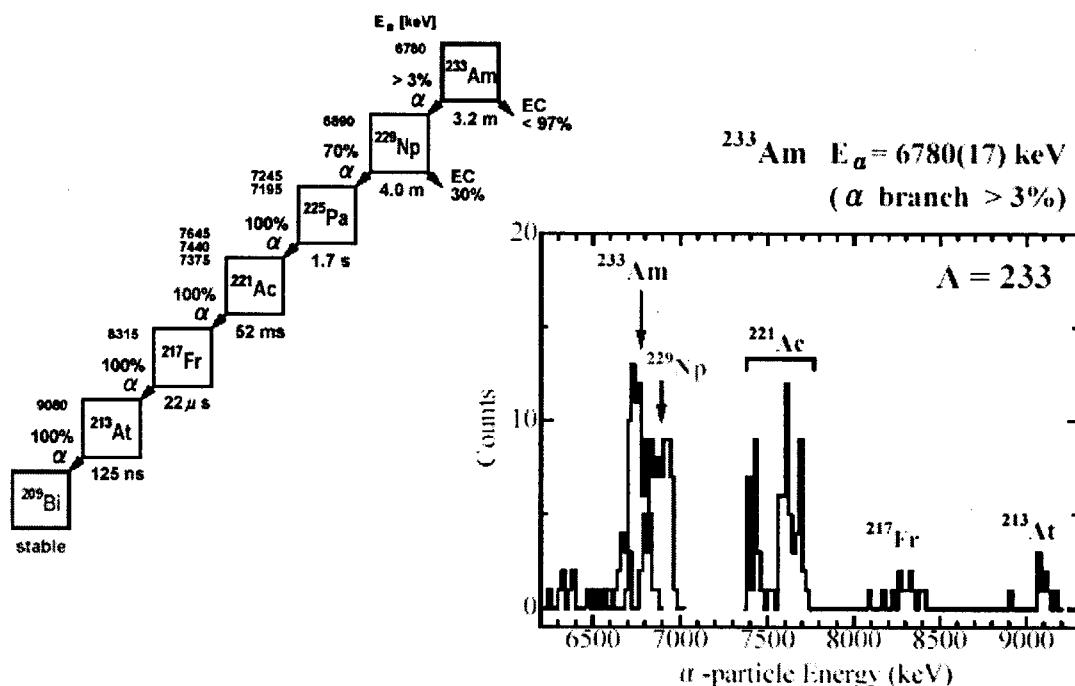


図1. 新核種 $^{233}\text{Am}$ の $\alpha$ 壊変連鎖と測定した $\alpha$ 線スペクトル

(\*) 第4期は、日本原子力研究所先端基礎研究センター、東京都立大学、徳島大学、名古屋大学、広島大学、岐阜医療技術短期大学、新潟大学の共同研究としてこれらの課題が実施された。

### 主な質疑応答

超重元素の化学的性質、特に相対論的效果についての質問があった。本研究成果からは、一概に相対論的效果について結論は出せない。さらに本共同研究における核化学研究の成果の世界的な位置付けについての質問があり、日本は世界に肩を並べるまでになったことが示された。以下に主な質疑応答を記す。

Q：原子核が大きくなると、いわゆる相対論的效果で化学的挙動が違ってくるのかどうかについての研究の進捗状況はどうなっているのか。また、中性子過剰のアクチノイドを用いた方が化学的挙動の研究には適しているのではないか。

A : ラザホージウムの化学的挙動が同族元素と同じかどうかという点に関しては、基礎化学反応のデータだけで、原子核が大きくなつたためにいわゆる相対論的効果で化学的挙動が違つてくるという結論を出すのは時期早哨ではないかと思う。例えばガス系や溶液系化学の実験をやるとかして推定しないと、これだけで同族元素と全く同じであり、もう研究しなくていいというわけにはいかない。実際、ラザホージウムは述べたような結果になつたが、もう少し重い他の元素では化学分離の系によって、同じものになつたり違つたものになつたりするということがある。原子核が大きくなつたため、いわゆる相対論的効果で周期律から離れるのかどうかは、簡単に結論を出すことは出来ない。

ここで紹介したアメリシウム233は、いわゆる中性子過小であるが、実際は寿命が長く、例えば化学的挙動を調べるというような時には、中性子過剰の方が望ましいが、ターゲットとビームの組み合わせでやると、どうしても中性子過剰核の生成は難しいことになる。このため、原研のタンデム加速器でも不安定核ビームという、少し中性子が過剰なイオンビームを当てて、もう少し中性子が過剰な方にいくような反応系を考えないとこの研究は難しい。ともかく中性子過剰のアクチノイドを作つて、その性質を調べるということは非常に重要なので、近い将来、もし不安定核ビームで実験ができるとすれば、新たな情報も得られるのではないかと考えている。

Q : 核種チャートにはまだ埋まつていない所があり、またどの核種を選んでいくかという時に、ハード的な面で使える加速器の性能などによる制約もあるが、現在のところ優先度の高いものは何か、また日本でそれがどこまで可能か。

A : 優先度と言うか、話題性という点では、やはり一番重い元素である。重い元素を作るということを、ドイツ、アメリカ、ロシアでやっており、ここが一番興味あるところである。しかし、加速器の強度とかエネルギーとかいろいろ制限があると、なかなかできない。このため、そうゆう最先端を行くのではなく、もう少し下でも今までちょっとしか実験されていないところを系統的にやって、将来的には一番重いところに行くための基礎データを集めようというような観点も重要である。今世界で一番重い元素を実験するためには、例えば1ヶ月位照射実験をやって二つ出来たとか、そうゆうなかなか難しい実験である。そういう実験ができれば一番望ましいが、それ以外でも、今言った分野でのデータは基礎的な情報として非常に重要なのではないかと考えている。

Q : その軽い方では宇宙における元素の生成などでの議論が今最も関心が高いということか。

A : そのとおり。ここで紹介したのは中性子過小核ですが、中性子過剰核についても、もう少し情報が分かれば、例えば宇宙でそうゆうアクチノイドがどのように生まれたかということについて、もっと情報が得られるのではないか。

Q : 原研タンデムに放射性核種の加速、不安定核種の加速装置を設置する計画が進んでいるが、それができると研究の発展性は大きいと考えてよいか？

A : そう考えている。ただ不安定核ビームで中性子過剰のアクチノイドができるかどうかについてはいろいろ制約がある。例えばビームが非常に弱いとか、エネルギーは十分であるがマイクロバーンのオーダーの反応では本当に十分生成できるかとか、まさに1ヶ月やって数個しか作れないような実験になるかもしれないが、実験の対象核種は広がると思う。

Q : そのような場合には、例えばプロジェクト共同研究的な体制の有効性はあると思うか？

A：今や一つの大学あるいは一つの研究所だけで、このような分野の研究はできる状況ではないと考えている。日本中の当分野の専門家が全部集まって進めるようなことを考えないと、本当の新しい成果は得られないと思う。

## 2.1.3 アクチノイド元素の固体化学と燃料工学の研究

原研東海 中村 彰夫

北陸先端科学技術大学大学院 辻 利秀

成果発表概要

本研究テーマは、原子力バックエンド技術開発に係わるアクチノイド系列元素の固体化学や燃料化学、燃料工学を対象にしたものであり、今第4期は下の二つの課題について、原研と大学が協力して研究を行った。

- 1) アクチノイド元素処理用セラミックス固化体の結晶構造と熱物性測定  
(名古屋大学: 松井恒雄)
- 2) メスバウア分光法によるアクチノイド化合物の構造化学的研究  
(東邦大学: 竹田満洲雄)

両課題共に、大学においては取り扱いの不可能なマクロ量（グラムオーダー）のプルトニウム（Pu）やネプツニウム（Np）といった超ウラン（TRU）元素を含む固体化合物系（酸化物、錯体等）を主な研究対象としており、このようなTRU固体化学研究設備・装置を備えた原研プルトニウム研究1棟（東海）において、大学院生を長期に受け入れる形で、研究が行われた。

課題1)においては、燃料の高燃焼度化やマイナーアクチノイド（MA）処理処分に関連して、ペロプスカイト、パイロクロア、螢石等の結晶構造の酸化物セラミックス中へのPuやNpの固溶（固定）の可能性について、TRU系に適用できるようにグローブボックス内に設置された雰囲気制御型高温X線回折装置、熱重量装置、微量熱量計等を用いて定量的な検討を行なった。その結果、これらの系へのTRU元素の固溶度や固溶に伴う結晶構造、欠陥構造、熱物性等が、雰囲気（酸化性、不活性、及び還元性雰囲気）制御により、顕著に且つ系統的に変化する挙動を明らかにし、TRU固化体材料開発につながる貴重な基礎データの収集を行なった。

課題2)においては、特異な陽イオン-陽イオン結合を有し、基礎化学及び応用の両面で注目される様々の有機・無機のネプツニル錯体系について、<sup>237</sup>Npメスバウア分光法を用いた系統的な構造化学的研究を遂行した。その結果、これらの錯体系でのNpイオンの原子価（5価及び6価）-メスバウアパラメーター（アイソマーシフト）- Np-O（酸素）結合距離、三者間の相関を初めて詳細に明らかにするとともに、その特異な磁気的性質についての新たな知見（一軸性の磁気異方性によるきわめて遅い常磁性緩和や磁気秩序の存在）を得た。

TRUを扱うという特殊性から、様々の（技術的・工学的、基礎科学的、教育的）意味で、この種の研究は、原研一大学間の共同研究として、両者の緊密な連携の下に遂行されることが最も望ましく、また必要とされていると思われる。21世紀における核燃料サイクル確立に向けて、バックエンド技術開発、そしてその中の固体、溶液を含めた凝縮相TRU物質の関与したバックエンド化学の重要性は今後益々増大していくと予想される。

また、3d（4d, 5d）電子系（遷移金属元素）と4f電子系（ランタノイド元素）の

ちょうど中間に位置し、遍歴/局在の双対性を最もあらわに示す $5\ f$ 電子系（アクチノイド元素）の基礎物理・化学研究の世界は、最後の未踏領域としての未知の魅力に満ちている。昨今の大学を取り巻く状況を考えれば、このような最先端TRU基礎科学・技術開発分野での次の世代の人材育成という面からも、このような共同研究の枠組みは、維持そして拡大されていくべきであろう。

### 研究組織

大学：辻利秀（責任者）（北陸先端科学技術大学院大学）

サブテーマ（1）松井恒雄、長崎正雅、有田裕二、重松宏武、山崎哲、佐藤剛、西芳正、光田聰（名古屋大学大学院工学系研究科量子工学専攻）

サブテーマ（2）竹田満洲雄、高橋正、北沢孝史、王軍虎、西村健、鈴木勝也、北代邦彦、遠藤弘樹（東邦大理学部化学科）

原研：中村彰夫（責任者）、小川徹、湊和生、山下利之、中田正美、正木信行、

音部治幹、白数訓子

### 主な質疑応答

Npメスバウア一分光法による構造化学的実験結果が紹介され、計算科学の適用について質問があった。軽い希土類元素の計算例はある。理論的予測は重要であるが、手法の問題もあって世界的に見ても計算されていない現状にある。しかし、予測しながら実験することは重要であり、アクチノイドに計算科学を導入すべきである。本研究成果として得られたデータを計算に利用するとよい、との意見があった。以下に主な質疑応答を記す。

Q：ネプツニウムのメスバウア系について、いわゆる計算科学的に中心金属を求め、それと今 のアイソマーシフトとの関係について、理論的な面から確証するという見方はあるか？

A：特にそういう観点で見たことはない。そこまで定量化できるような方法は考えられるのか。

Q：一つの考え方として、アクチノイドを扱うこと自体がいろんな面で難しい部分があるので、 ある程度の予測をしながら進める手法は重要である。

A：当共同研究に関しては、そのような視点は特にもっていない。

Q：世界的にはそういう動きはあるのか？もっとグローバルに見た時に、そういう動きはない のか？

C：おそらく行われていないと思う。ランタノイドでそういう結合性があるというのは、軽い 方で行われているが、アクチノイドの重い方の元素になると、そのような理論的 な研究は私の知る範囲内では行われていない。理論的な研究、計算でもって逆にメスバ ウアのデータが利用されていくと非常によい。

C：例えばアクチノイドでも超アクチノイド元素の化学的な部分などで、相対論を加味した 色々な計算手法が行われており、アクチノイドについてはある意味では計算科学はかなり 進歩しつつあるのではないか。精度はどこまで信頼できるかという問題はあるが、そ うゆうものもどんどん導入していくかないとまずいという気がする。

C：そのとおりである。

C：館盛さんの意見はもっともと思うが、やはり計算手法の問題だろう。メスバウアではコンタクトデンシティが問題になりますから、その精度を上げようとする計算と、周りの錯体でリーガント（配位子）がどうなるかを評価するような計算で、なかなか絶対値が正しくなるような計算はまだまだ出来ていない。知っている限りでは、武田先生が言われたように鉄とか錫みたいな典型的なメスバウア核種でも難しい。その理論とアイソマーシフトのコリレーションを作るのはむずかしいのが現状だと思う。

C：私もそう思います。

## 2.1.4 アクチノイド元素の溶液化学と分離分析技術 －アクチノイドの電気化学的基礎物性－

京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科

○木原壯林、前田耕治、吉田裕美、糟野 潤、市枝信之、上原章寛  
原研先端基礎研究センター 吉田善行、北辻章浩、武石秀世、青柳寿夫

アクチノイド (An) 各種の溶液化学における重要課題は、その化学型、酸化還元挙動および液液界面あるいは固液界面移動挙動の把握である。それは、AnとともにU、Np、Pu、Amが水溶液中で多数の酸化状態をとり、酸化状態は不均化反応や溶存酸素との反応によって容易に変動し、また、Anイオンは高原子価であるため溶液のpHや共存陰イオンによって様々な化学型に変化するからである。にも拘わらず、研究報告の比較的豊富な酸性溶液中での酸化還元反応についてできえ、系統的かつ正確なデータが集積されているとは言い難い。したがって、この分野の研究が進展すれば、Anの高選択的分離、再処理や廃棄物処理プロセスの制御、地中移行挙動の理解などの更なる発展が期待される。

本発表では、過去の大学一原研共研で得た成果のうち、(1) Anの水溶液中（とくに酸性溶液中）での酸化還元電極反応に関する既存データの厳密な評価、(2) Anの水溶液・有機溶液間移動エネルギーおよび移行機構の溶媒抽出法による測定と評価について述べる。

### 1. 酸性溶液中でのAnの酸化還元データの厳密な評価

700報にのぼる既存研究論文を精査し、また、著者らの30余年の研究成果に立脚して、信頼できる標準酸化還元電位を提案した。また、従来容認されてきた酸化還元機構は極めて不完全であることも指摘し、新しい機構を提案した。

#### 1.1 U、Np、Pu、Amの標準酸化還元電位の再評価

従来提案されているAnイオンの標準酸化還元電位、 $E^\circ$ 、について再検討したところ、提案されている $E^\circ$ のかなりの部分が電気化学的な実測値ではなく、分光学的データ、溶解度、気体としてのイオン化ポテンシャル、水和エネルギーなどから計算して間接的に求めたものであるため、その精度がかなり低いことが判明した。また、電気化学的実測値であっても、それを熱力学の定義にしたがった $E^\circ$ に変換するにあたって、採用した活量補正法が適切でなく、副反応を無視しているため、大多数が数10から100 mVの誤差を含むことも明らかになった。本研究では、電気化学的実測値を集積し、その測定条件を厳密に吟味するとともに、最新の理論によって活量補正して、最も信頼できると考えられる $E^\circ$ を提案した。 $E^\circ$ の温度係数も再評価した。

#### 1.2 U、Np、Puの電極反応機構

U、Np、Puの酸化還元過程の中で $\text{AnO}_2^{2+}/\text{AnO}_2^+$ 、 $\text{An}^{4+}/\text{An}^{3+}$  過程は可逆である。 $\text{UO}_2^{2+}$  の1電子還元生成物 $\text{UO}_2^+$ は不均化反応し、 $\text{UO}_2^{2+}$  とU(IV)を生成するが、U(IV)の化学型は一般には $\text{U}^{4+}$  とされていた。本研究での理論的、実験的考察の結果、発生直後の化学型は $\text{UO}_2^{2+}$  であり、 $\text{U}^{4+}$  に変化することを確認した。

$\text{AnO}_2^+/\text{An}(\text{IV})$  過程は極めて非可逆であり、通常のボルタントリーやポーラログラフィーでのこの過程の電流-電位曲線を観察した例はない。著者らは近年の10数年間に、カラム電極電解法を適用して、硝酸、塩酸、硫酸、過塩素酸、リン酸中でのU、Np、Puの $\text{AnO}_2^+/\text{An}(\text{IV})$  過程の全

てを電流? 電位曲線として測定し、カラム電極電解理論に従って解析した。ここでは、この成果と従来の溶液化学的成果とを総合して、 $\text{AnO}_2^+$ /An(IV)過程の全容を明らかにした。U、Np、Puのいずれについても、 $\text{AnO}_2^+$ の還元における初期生成物An(IV)は $\text{AnO}^{2+}$ であり、 $\text{H}^+$ との後続反応によって $\text{An}^{4+}$ に変化すること、 $\text{AnO}^{2+}$ の不均化反応生成物 An(V)は $\text{AnO}_2^+$ とは異なる化学型であることの発見は特筆に値する。

## 2. 酸性水溶液中の An の水相/有機相間移行自由エネルギー ( $\Delta G_{\text{tr}}$ ) のイオン対抽出法による決定

水相(W)/有機相(O)間 $\Delta G_{\text{tr}}$ の評価は、イオンの抽出分離法や膜分離法の設計のみならず、イオンの溶液化学的特性の評価においても重要である。しかし、An イオンのように高電荷を有する親水性イオンの場合、①水溶液中で加水分解されるため酸性溶液中でしか安定に存在しない、②有機相への分配が小さいなどの理由によって  $\Delta G_{\text{tr}}$  の測定は困難である。そのため、共存する  $\text{H}^+$  と区別して An イオン  $\Delta G_{\text{tr}}$  を評価した例はない。著者らはすでに、イオン対抽出分配比 D と抽出平衡内で生じる素反応の熱力学定数 ( $\Delta G_{\text{tr}}$ 、イオン対生成定数  $K_{\text{ip}}$  等) との関係を表す式を提案し、実測の熱力学定数および分配比を用いてこれを証明しているが、ここでは、同理論を多成分系に拡張し、イオン対抽出法によって An イオンの  $\Delta G_{\text{tr}}$  の評価を行った。詳細は割愛するが、ここで用いた理論は、抽出平衡が達成されたとき、系に含まれる各イオンによって生じる全ての界面電位差  $E_i$  は等しくならなければならないという仮定に立脚している。

本研究で、分配比から見積もった  $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{NpO}_2^{2+}$ 、 $\text{PuO}_2^{2+}$ 、 $\text{NpO}_2^+$ の $\Delta G_{\text{tr},i}^0$  は、それぞれ 72、69、66、53 kJ mol<sup>-1</sup> であった。 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{NpO}_2^{2+}$ 、 $\text{PuO}_2^{2+}$ の $\Delta G_{\text{tr},i}^0$  は、 $\text{Mg}^{2+}$  の W/NB 界面移動の $\Delta G_{\text{tr},i}^0$ 、64 kJ mol<sup>-1</sup> に近い。 $\text{NpO}_2^+$ の $\Delta G_{\text{tr},i}^0$  は、1 倍イオンの割にはかなり大きくこのイオンは親水的である。

## 3. まとめ

本研究では、(1) 酸性溶液中での U、Np、Pu の酸化還元データを厳密に評価し、その結果を取りまとめた。今後は、An の処理処分において重要な中世あるいは塩基性水溶液中での酸化還元挙動の研究へ発展させたい。(2) イオン対抽出の原理を明らかにし、それに立脚して幾つかの An イオンの  $\Delta G_{\text{tr}}^0$  を決定した。今後は、残余の An イオンや有機溶媒を変えたときの  $\Delta G_{\text{tr}}^0$  を決定して、溶液化学の基礎データとしたい。

### 主な質疑応答

発生直後の U(IV) の化学型は、4 値に酸素が付いている不安定な  $\text{UO}^{2+}$  であるという発表に関して、その安定性についての質問があった。1 秒以下の不安定な中間体として存在するが、有機溶媒系あるいは中性溶液では安定する。ネプツニルの酸素の位置については、今のところ不明である。フローセルの使用に関する質問があり、なじませ方、乾燥、ガラスの材質などについて説明があった。以下に主な質疑応答を記す。

Q：4価に酸素がくっついているというものは、中間体という位置付けか、それとも寿命の観点から言って、固有の時間を持っているのか。

A：まだ測っていないが、半減期みたいなことを考えると1秒以下の非常に不安定な中間体である。ただ次に還元反応が起こったり吸着したりする時に安定化されるので、そうゆうものが吸着して、次の反応や地中移行などに関連していくかもしれない。

Q：例えばアクチニルの酸素との距離とか、そうゆう例えば「ニル」だと、赤道じゃなくて、軸方向で2個あるのが今の4価の1個の酸素というのは、1個作れるから何方向とは言えないのかも知れないけども、かなり自由に動けるのか、そうゆうことが分からんですね。

A：短寿命ですからX線を使うとしてもなかなか難しいので、他の物性で調べており、まだそこまではいっていません。

Q：水溶液系だと安定にウラン5価が存在すると思うが、この点について「ニル」タイプでまとめたと言われたが、有機溶媒系でのウランあるいはウランに限らず「ニル」タイプの研究はまとめられているのか。

A：今のスピーシーズについては安定だと言われたのは、5価ではなくて4価ですが、そうゆうものが有機溶液中で安定ではないかということか？

Q：水溶液系ではウラン5価に関して、言われる通り不均化で非常に不安定である。しかし有機溶媒系では、かなり安定、あるいは炭酸根が着いたりするとかなり安定になるという情報もあるかと思う。

A：有機溶媒も含めて中性溶液中では、このスピーシーズはどんどん安定化してくると考えられます。

Q：有機溶媒系でフローセルを使ってみようと思ったが、うまくいかなかった。その理由は何かあるんでしょうか？

A：バイコールガラス管隔膜が割れたりなどするのではないかと思うが、例えば、ジクロロエタンやニトロベンゼンは我々でも大丈夫だということは分かる。また有機溶媒ではないが液体アンモニアでは、温度が変わって駄目であるが、水が入っているところに急激に有機溶媒を流したりするとうまくいかないとか、馴染ませ方を急にやると具合悪いとか、いろいろある。さらに水の中に使っていても乾燥させると駄目だということもある。特に問題になるのは一般的にはバイコールガラスがあまり丈夫でない。電解隔膜が丈夫でない点が一番問題である。有機溶媒についても検討しているので、どんな溶媒か教えていただければ、あとでお答えできると思う。

## 2.1.5 廃棄物処分と環境化学

東京大学 長崎晋也

原子力エネルギー利用について、放射性廃棄物の処理・処分問題を中心としたバックエンド問題の解決は緊急かつ重要な問題と認識されている。同時に総論としては理解できても我が近くは反対という不安に基づく反対があることも事実である。この複雑なバックエンド問題を解決するには客観的、定量的な理解と丁寧な説明が時間がかかるようでも正当法であると考える。そのためにはそこで起こっている現象を基礎的理解に基づき正しく認識し予想することが必要である。同時に安全性、予想性、経済性等に優れた方法を目指しての基礎的、先駆的な研究も極めて重要である。このような認識に基づいて、第4期原研・大学プロジェクト共同研究の「廃棄物処分と環境化学」においては、

- (1) 固液界面におけるアクチノイド(III)高分子電解質錯体の微視的構造の推定
- (2) 緩衝材中のオーバーパック材の腐食と核種移行に関する研究
- (3) 鉄鉱物の結晶化機構とウランの挙動
- (4) アクチノイド元素含有鉱物の生成に関する基礎的研究
- (5) 地下水中におけるアクチニド元素の溶存形態に関する研究
- (6) コロイドの固相への付着挙動における流速依存性
- (7) ネプツニウムの鉄酸化物への吸着挙動

に関する研究が進められた。

(1)では、レーザ誘起蛍光分光法による界面現象の解明が進められた。最初にEu(III)を対象としてモンモリロナイトへの吸着について界面での存在状態が検討され、その後、モンモリロナイトへフルボ酸錯体として吸着されたCe(III)の存在状態の理解へと研究が進められた。

(2)では、緩衝材の候補材料であるNa型モンモリロナイト中におけるNp(V)の拡散と吸着挙動が研究された。同時に、オーバーパックの腐食生成物がベントナイト中を拡散した場合にFe型モンモリロナイトを生成する可能性が指摘されており、Fe型モンモリロナイトへのSeやNp(V)の吸着挙動の理解と、X線顕微鏡による内部微細構造の解明が進められた。

(3)では、従来ウランの鉱物粒子への吸着挙動のみで評価されていたウランの移行挙動が、実は変質生成物である鉄鉱物との反応などの結晶化プロセスに強く影響されていることが明らかにされた。さらに、特別な鉱物の存在によりウランの鉱物化を引き起こす可能性が示された。

(4)では、深地層処分環境におけるガラス固化体の鉱物化挙動およびその過程におけるアクチニド元素の鉱物中への固定化挙動の検討が行われた。そして、鉱物構造の同定と鉱物化に影響を及ぼす因子の整理が進められ、PuやNpがほぼ全て変質鉱物内に留まることが明らかにされた。

(5)では、核種移行に重要な影響を及ぼすと考えられている腐植物質に関し、北海道十勝川地下水から分離・精製したものについて化学的特性ならびにアクチニド元素との錯体形成挙動が検討された。錯体形成については、地下水のpHやイオン強度の影響、金属の価数の効果などが錯体の分子サイズ分布や3次元蛍光分光法などにより調べられた。

(6)では、コロイド粒子が多孔質媒体あるいは亀裂媒体中を移行する際に、固相表面にどのような付着挙動を示すのかが実験とモデルにより検討された。固相表面はコロイド付着能力とい

う観点から均質ではなく、付着能の高いサイトから低いサイトまで幅広く分布している。コロイドが付着能の高いサイトから順に付着していく現象が示され、合わせて付着現象に及ぼす流速の影響などがモデルにより定性的に表現された。

(7)では、Fe(II)を含有する鉄鉱物（マグネタイト）にNp(V)が吸着する際、Fe(II)によるNp(V)のNp(IV)への還元反応が起きるのかどうかについて実験的な検討が行われた。吸着分配比や吸着速度、脱離実験およびそこでのNpの酸化数の評価などを通して、Fe(II)による還元が有意に起こることが明らかにされた。

第4期プロジェクトは、(1)から(7)までの研究が互いに独立に実施されてきたが、そこから2つのことが明確に浮かび上がってきた。第1に、2000年レポートなどの多くの安全評価シナリオにおいて、暗黙の了解となっている現象が必ずしも正しくないこと。すなわち、前提条件の中で影響の大きいプロセスについて再度科学的に検討していく必要があることがわかった。第2は、自然是均質ではなく不均質であり、不均質性が核種移行等の物理的、化学的プロセスにどのような影響を及ぼすのかを、より詳細にかつ定量的に明らかにしていく必要があることもわかった。今後、基礎的な研究とともに、第4期プロジェクトから抽出された種々の課題の解決に向けて、さらに研究が着実に進められることが期待される。

### 主な質疑応答

トレーサー量のネプツニウムで実験したという報告にたいして、マルチトレーサーを使った実験についての質問があった。大半はネプツニウムのみの実験であるが、不均質という現実的な方向へ進むためにはマルチトレーサーの実験は大切である。錯生成や吸着に関する研究ではマルチトレーサーを使った実験例はある。自然是不均質であるが、均質系の実験だけ行われたか、との質問があった。熱力学的研究は単純実験であり、ミクロ的結果が得られるのにたいして、ユッカマウンテンの土壤や水を使った実験、つまりフィールド試料を使った実験では、マクロな結果が得られる。この二つの実験にはギャップがまだある。実験室レベルでは天然とはどういうものか予想できていない。条件を仮定した実験の結果は本当に合っているか、深く検討して研究すべき、とのコメントがあった。以下に主な質疑応答を記す。

Q：ネプツニウムはトレーサー量で実験しているのか。

A：トレーサー量である。

Q：いくつかの元素を一緒に入れてマルチトレーサー的に実験をやったのか。ランタノイドも含めてケミカルに理解しやすいものに対して、ネプツニウム、プルトニウム、ウランなどを比較して見ていかないと、1cm違っても鉱物とかフミン酸とかの性質が変わってきて正確な振る舞いを把握できない。そういう意味でマルチトレーサー的な研究は非常に大切である。

A：ご指摘の通りだと思います。しかし、今回紹介したものの中の大半は、ネプツニウムであればネプツニウムだけを選択的に使っている。ただガラスの溶解とか、鉱物化なども同時に見ることもある。やはり他のマルチトレーサーとしての色々なものの比較を通して

て調べることは大事なので、次のステップはやはり単純なもの、理想的なものから、より限定された方向へ向かっていくことが当然考慮されるべきである。

C：フミン酸との錯生成とかフミン質物質の吸着については、私達のグループでもマルチトレーサー的な研究をした。ただしアクチノイドではなくランタノイド系のあとに絞って行ったので、このプロジェクト研究とは全く別である。長崎先生は色々な吸着系や自然是不均質だということを言わされたと思うが、色々な系でマルチトレーサー的なアイデアは更に伝わってくるのではないかと考えている。

Q：自然是不均質だということは、当たり前のことと思うが、こうゆう研究は今まで均質系としての実験しか行われてこなかったのか？

A：ある意味で両極端をイメージしてもらって構わない。一つは溶液化学あるいは熱力学に乗るようなレベルでの研究がある。もう一つは実際に何処かの土壌を取ってくる。極端な話アメリカであればユッカマウンテンの水や土を探ってきてそこに乗せてみる。あるいはゴアレベンで同じようなことをしてみる、というようなフィールドの試料を探ってきて行う実験がある。ただしフィールドで行うと、例えばネプツニウムの酸化数はこんな分布でしたよ、吸着した量はこうでしたよ、などという極めてマクロな結果になってしまふ。このマクロな結果と実験室レベルのものを合わせ込む。一つは加算性があるかどうかとか、そういう形の合わせ込みとかは当然されている。しかし、まだ大きなギャップがあつて自然の試料を使った研究は、必ずしも実験室レベルのもので予測出来ていない。そこをうまくつなげていく時に、マクロからいく時とミクロと言うか、理想系からいく時に、不均性と言うか、自然はどうゆうものであるかということを考慮することが望まれる。これは館盛先生も言っていたような新しい理論のものと、それから溶液実験やメスバウア実験などがあつてモル数や $10^{23}$ 個を相手にする。ところが量子化学計算では原子の数がせいぜい100個である。MDを使ってもスーパーコンピューターでせいぜい100万個、大きいようで $10^6$ 個にしかならない。そこには非常に大きなギャップがある。そこを埋めていくということを恐らくやらなければいけない。それと同じような感覚ではないかと思う。

Q：我々も実験の時に、暗にある条件を仮定している場合があるが、その条件が本当に実際に合っているかは非常に重要である。例えば高レベル廃液を対象にストロンチウムを取り出すときに、核分裂生成物だからストロンチウムとバリウムがアルカリ土類として対象であろうということで、ストロンチウムのようなよりイオン半径の小さいものをバリウムと比較して、吸着や抽出するという観点でいた。ところが、ある時JNCの方から実際の高レベル廃液の組成を見せられたところ、大きなカルシウムのピークがあり、大変驚いた。だから実際の条件は非常に良く深く検討して押さえていかないと、実際と隔たった条件で実験をすると全然意味がなくなってしまう。

A：その通りと思います。

## 2.1.6 成果の総括と今後の研究展開

東京大学 田中 知

平成11年度—平成13年度の3年間におよぶ第4期バックエンド化学プロジェクト共同研究では、「アクチノイドの化学と工学」をサブタイトルとしての研究の展開が図られた。第4期の進め方については第3期の終了時点で大きな議論があった。すなわち、昭和61年より開始されたバックエンド化学共同研究が14年目であるということを意識して、外部情勢の変化や本共同研究に求められている使命についても自覚しつつ課題の選定を行い、進め方や成果の出し方について検討が行われた。また、募集方法の改善など現制度の見直しや、萌芽的・黎明的研究も視野に入れて、次世代により良い研究環境を伝えることも重要であることが認識された。これらのことは、第4期での研究遂行において常に意識されたと思われる。また、大学において放射性物質や核燃料物質を用いて行う研究がますます難しくなっていくなかで、その研究を原研において研究環境の整備も伴って行われたことや、それらの研究を通して若手研究者育成にかなりの力が注がれたことは評価される。このように、我が国におけるバックエンド研究の基礎の展開とその広がりが図られ、同時に多くの研究成果がでたことの意義は大きいと評価される。また、バックエンド化学には従来直接関係していなかった、研究者（たとえば、錯体化学、量子化学、環境水科学研究者等）が参加したことの意義も大きい。

第4期の後半においては、日本原子力研究所と核燃料サイクル開発機構との統合に向けての議論が活発になり、そのなかで、当然日本原子力研究所においてバックエンド関係の研究の展開や、大学・原研プロジェクト共同研究のあり方が俎上にあがった。また、平成16年度より大学が独立行政法人化されるなかで、原子力関係の実験的研究を続けていくことが一段と困難になることが予想された。このような状況の中で、今後のプロジェクト共同研究をどのように進めていけばいいのかについて第4期の開始以来、原研、大学双方の研究者で真剣に議論されてきた。結論的には、バックエンド関係の研究を大学原研共同研究として続けていくことは、我が国における原子力研究開発の基礎基盤研究の推進、若手研究者育成、放射性廃棄物処理処分の安全を支える基礎研究の展開、新しい核燃料サイクルの開発の基礎の推進、これらの基礎としてのアクチノイド元素化学基礎の充実において極めて重要であるとの判断になった。また、今後重要性がますます産官学連携の先駆的な共同研究であるという点でも重要であるとの理解になった。そして、時代の要請と、成果の反映、裾野の広がり等に留意しつつ平成15年度より新しい形「原子力重点共同研究（仮称）」で進めるべきという結論になった。原子力重点共同研究（仮称）はその目的を、原子力科学技術の基礎及び応用研究の重点化、産官学の連携、人材の育成、成果の社会への還元に置いた。共同研究の枠組みとしては、原研と大学の研究者を中心とした、国公立研究機関や民間企業も参加可能なものとすることとした。共同研究の窓口としては、原研側は、研究協力推進室、大学側は、東京大学原子力研究総合センターがあたるものが相応しいとした。また、運営方式としては、原研施設利用協議会（原研）及び、原研施設利用委員会（東京大学原子力研究総合センター）の下に合同の運営委員会を設けること、装置・施設については、主要装置・施設は原研のものとするが必要に応じて大学、国公立機関及び民間の装置・施設も利用できるものとすることが検討された。また、予算措置については、共同

研究遂行のための研究費は原則として共同研究者当事者の負担とすることや、研究リーダーは、科研費等の申請など資金の確保に向けて最大限の自助努力を図ることが相応しいとされた。また、リーダーシップの重視や、原則3年の研究実施期間がうたわれたことも注目される。この原子力重点共同研究（仮称）は、それまでのプロジェクト共同研究の総括のもとに、様々な批判、評価を真摯に受け止め、同時に、これから原子力バックエンド研究の展開になにが必要であるのかを、大学、原研の現場の研究者が場合によっては立場を離れて議論した結果であった。しかし、この原子力重点共同研究（仮称）を、バックエンドプロジェクト共同研究の第4期が終了するに引き続いて平成14年度より開始することはできなかった。様々な理由が考えられるがその一つに、統合問題のなかで求められる経費の削減についての検討が不十分であったことが挙げられる。しかしながら、本構想の意義は現在でも変色していないと考えられる。今後のJJI統合や、大学の独立行政法人化の中で、原子力研究を展開していく時、産官学連携はその重要性が増すと考える。その中で、10数年間にわたる共同研究の経験と、多大の研究成果、および、人材育成の実績のある、大学・原研バックエンド化学プロジェクト共同研究は、からの様々な連携の先駆となり、そこでの成果と評価を踏まえてさらに理想的な共同研究システムに進んでいくことが必要であると考える。

平成15年度からは原研大学共同研究の中に、連携重点研究が開始された。合計、7件の課題が行われることになるが、その中に、「次世代再処理におけるアクチノイド元素の特異な振る舞いに関する研究（大学側グループリーダー：池田泰久（東工大）」と「より広範な地質化学条件が放射性核種の地球移行に及ぼす影響の研究（大学側グループリーダー：長崎晋也（東大）」がある。この連携重点研究は、平成13年度に議論された「原子力重点共同研究（仮称）」とは、運営の行い方等で、やや異なるところもあるが、リーダーシップの重視などこれまでにない取り組みがとられている。今後より良い連携共同研究システムに進んでいくことが期待されている。

### 主な質疑応答

総括として、第3－4期間に本プロジェクト共同研究の展開について議論があったこと、その後に独立行政法人化やJJI統合の検討が始まったことが説明された。これに対して、次のような意見があった。研究の裾野が広がったことや研究の場があることは重要である。大学側からは、常にアクチノイドを扱う場所がないと言ってきた。基礎研究ができる場が少なくなっている。大型プロジェクトでは、化学の基礎研究は難しくなる。大型プロジェクト研究でも、原子力利用研究だけではだめである。学会など広いところで国などへバックエンド研究の重要性を主張すべきである。本プロジェクト共同研究は学生の教育の場としては役に立った。教育とは評価しにくい面があるが、教育面での主張も必要である。以下に主な質疑応答を記す。

Q：もっともな話だと思うが、現実を見ると原研でも我々がアクチニドを扱う場所がないと言ってきて、またこのプロジェクト共同研究が大事だと言ってきたが、基礎的な研究を進める場所が出来ているかと言うと、そうではない。原研が悪いとか良いとかいうわけではないが、深刻な問題になりつつあると思っている。

プロジェクトを立ち上げることが、そういう研究を進める場を確保していくことにつながるかもしれないが、もっと積極的にやらないと大型のアクチニドのプロジェクトはいくらでもできるが、小回りの利くアクチノイドケミストリーの研究は難しくなるのではないかと思う。この点をどうするかは課題であると思うが、如何ともしがたい。

A：ご指摘ごもっともと思う。大型のアクチノイド研究は楽かと言うと、恐らくそうではなく、J.J.統合の中で経費の枠が限られている中でどうしていくのか、難しい議論があるかと思う。

同時に日本の原子力利用研究を進めていくためには、それなりのプロジェクトを立てて大型施設も評価していかなければいけないと思うし、それだけではなくて、木原さんが言われるとおり、実験室など小さなレベルでの研究を進めていくことが大事と思う。

このような場とか、学会とか、あるいはネットワークなど広い場で、このような研究をやることの必要性と大型の装置を持ち、同時に小さな装置も持つて進めることの必要性を、統合の機関とか大学あるいは国の方に言つていかないといけないと思う。昔は原研に装置があるというような時代であったかもしれないが、現実はそうではなくなりており、この点を大学側は十分認識し、共同戦線を張るところは張つていかないと、こういう場を作つても、それを有効に活用できないと思う。

Q：私も本プロジェクト共同研究ですいぶん厄介になったが、このプロジェクトの大きな成果の一つは、研究の内容自身もそうであるが、やはり学生の教育及び若い人達、特にポストドクのトレーニングの場として非常に役に立った。このお陰である意味で今の若い研究層が育ってきていると言ってもよく、教育っていうのは評価しにくいし、なかなかそれでお金取るのは難しいが、やはり教育面の成果を是非大きく強調していただきたい。

A：おっしゃる通りで、特に大学院生、大学の方々の教育あるいは若手研究者の育成ということで大変重要な意義があったということを強調したところである。

## 2.2 放射線高度利用 第4期研究成果のまとめ

### 2.2.1 放射線高度利用第4期研究のねらい

名古屋大学大学院工学研究科 河出 清

第4期研究は第1期から第3期の基本的考え方である、所属の異なる複数の研究者集団からなること、研究期間を3年とし、どこまで期間内で達成するのか、そのための研究方法と研究を進める研究者組織は適切かという観点から、テーマの提案者からのヒアリングの実施等の事前評価を行い、以下の4つのプロジェクトテーマを採択した。

#### (1) 劣化環境下における植物の養分吸収機構の研究

第3期でポジトロン放出核を利用した研究の有効性の実証および観測画面の広角化と標識化合物の高収率化というハード面の課題の解決に目処が立ったという成果に基き、不充分なマシンタイムの中にありながらも今期は一層の具体的、世界的な研究成果を上げることを目指した。特に、劣化した土壌・大気において植物が如何にして栄養分を吸収するかという点に着目した。

#### (2) 大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用

東北大の石井慶造グループと高崎研究所が事前にマイクロビーム作成手法の開発研究を進めていたものであり、テーマの根底にハード技術の着実な開発がある。研究としては更に使い易いシステムの開発を継続しつつ、具体的利用分野の拡大を計るため、他分野からの研究者の新規参入を得てマイクロビーム利用研究の展開を目指したものである。

#### (3) 陽子加速器施設における放射線安全性に関する研究

第2～第3期で着実に積み上げた断面積等の基礎データの上に、新たに保健物理分野のグループの参加を得て、高エネルギー加速器研究施設における放射線安全性への研究の展開を目指した。研究の主眼は、加速器施設における人体の外部及び内部被ばく線量評価に必要な基礎データの測定・評価と、施設に設置するための高エネルギー中性子用モニタ・線量計の開発に向けられた。

#### (4) 材料照射損傷に対する核変換生成物の影響に関する研究

第3期に高崎研究所の施設特色の一つであるトリプルビーム照射機能を具体的な核融合炉候補材に対して適用して得た成果に基づき、今期はより一般性のある核変換生成物効果を含む材料照射損傷研究の統一的理解に目的を絞った研究を目指すものである。

#### 主な質疑応答

特になし。

## 2.2.2 陽子加速器施設における放射線安全に関する研究 －高エネルギー中性子モニタ用検出器の開発－

原研：山口恭弘，佐藤達彦，遠藤 章，金ウンジュ，吉澤道夫，田中 進

東北大学：中村尚司，潮見大志，Danielle R. D. Rasolonjatovo

平成12年度から3年間、高エネルギー陽子加速器施設における放射線安全を確保するために必要な被ばく線量評価・測定に関する研究を行った。本研究は、次の3課題から構成される。

- 1) 外部被ばく線量評価用基礎データの評価
- 2) 高エネルギー放射線用モニタ・線量計の開発
- 3) 内部被ばく評価用基礎データの評価

本発表では、これら3つの課題の成果の概要を述べるとともに、100 MeVまでの中性子を対象とした線量測定のためのモニタ用検出器の開発を紹介する。

### 1. はじめに

大型加速器施設を利用した基礎科学的研究、原子力開発、医療研究が、先進国において幅広く展開されようとしている。日本では、原研と高エネ研が共同で大強度陽子加速器計画（J-PARC 計画）を進めている。このような施設においては、原子炉施設や放射性物質取扱い施設とは異なった放射線防護を考える必要がある。中でも、高エネルギー粒子ビームがターゲット等に当たり発生する中性子は、厚い遮へい体壁を透過して作業者や周辺公衆に被ばくを与える恐れがあるので、このようなエネルギーの高い中性子に対する線量評価や線量測定が重要な課題である。また、加速器室内で発生する核破碎核種等のエアロゾルの粒径は、原子炉施設で観測されるものよりも小さいために、この吸入による内部被ばく線量評価に関しても解決すべき課題がある。そこで、これらの課題を解決し陽子加速器施設における被ばく線量評価法を確立するために、平成12年度から3年間にわたりプロジェクト共同研究を行った。

### 2. プロジェクト共同研究の成果概要

本プロジェクト共同研究で取り組んだ3つの研究課題の概要を以下に述べる。

#### (1) 外部被ばく線量評価用基礎データの評価

GeVオーダーの陽子加速器施設においては、100 MeV以下の中性子の線量寄与が大きく、その評価が重要である。しかし、20 MeV以上の中性子の線量評価に必要な中性子輸送断面積や荷電粒子生成断面積のデータは十分に評価・整備されていない。また、幾つかの線量計算コードによる評価結果にも大きな差が見られ、これらを検証するための測定データもない。そこで、40 - 90 MeV領域の中性子束が精度良く評価されているTIARAの準単色中性子場を利用し、中性子入射による人体構成元素 (H, C, N, O) の弹性散乱断面積及び荷電粒子生成断面積を測定した。この実験は、広く知られている高エネルギー断面積ライブラリーLA-150の評価値の妥当性検証のための貴重なデータを提供した<sup>1), 2)</sup>。また、アクリル及び水ファントム中の吸収線量分布及び線エネルギー分布を測定し、線量計算コードの精度検証データを得た<sup>3)</sup>。

## (2) 高エネルギー放射線用モニタ・線量計の開発

原子力施設等で使用されている通常の中性子モニタや線量計は、20 MeV以上の中性子に対して感度が低く、被ばく線量を過小に評価する恐れがある。このため、20~100 MeVの中性子に対しても適切な線量応答特性を有するモニタや線量計の開発が望まれている。そこで、100 MeVまでの中性子の線量測定を目的とした2種類の中性子モニタに関して研究を行った。一方は、従来の中性子レムカウンタの減速材中に鉛ブリーダーを設置したものである。この鉛ブリーダーの効果により高エネルギー側の応答が改善され、実用化の見通しが得られたので、J-PARC計画の第1期施設に設定される予定である。他方は、有機液体シンチレータに線量変換スペクトル荷重関数（G関数）を適用するものである。TIARAの準単色中性子場等での実験の結果、数MeV~100 MeVの中性子に対するモニタとして使用可能であることが実証された<sup>4)</sup>。また、有機液体シンチレータと他の検出器を組み合わせて、熱エネルギー~100 MeVの広帯域対応とするための研究が行われた<sup>5), 6), 7)</sup>。さらに、積算線量計用の検出器に関して研究を行った。数10 MeV中性子に対して、3種類の固体飛跡検出器の感度及び増感用ラジエータの効果が調べられた<sup>8), 9)</sup>。また、過熱液滴型検出器に関して、感度、温度依存性、鉛ブリーダー効果が調べられた。なお、中性子モニタ用検出器の開発に関しては、第3章で詳しく述べる。

## (3) 内部被ばく評価用基礎データの評価

高エネルギー加速器施設のターゲット近傍、加速器室等においては、様々な核破碎核種等が生成される。これらの吸入による内部被ばく線量は、放射性核種のエアロゾル粒径や化学形に大きく依存する。このため、これらの性状データは、作業者の内部被ばく線量評価や施設の換気設計等を行う上で極めて重要な因子である。そこで、TIARAの準単色中性子をArガス、Krガス、雰囲気を制御した空気に照射し、生成された放射性エアロゾルの粒径やガスの化学形を測定解析した。その結果、核破碎核種が雰囲気中の固体状または液体状の非放射性エアロゾルに付着し放射性エアロゾルが生成されるという機構を明らかにした<sup>10)</sup>。また、TIARA加速器本体室内で難燃性ケーブル中のClやBrを起源とする放射化生成物が観測され、加速器施設に用いるケーブルの仕様の検討や被ばく評価に有用なデータが得られた。

## 3. 高エネルギー中性子モニタ用検出器の開発

GeVオーダーの陽子エネルギーの加速器施設においては、ターゲットで発生し厚い遮へい体を透過してくる中性子が、熱エネルギーからGeVオーダーまでの幅広いスペクトルを持っている。しかし、この内人体の被ばく線量に主に寄与するのは100 MeV以下の成分である。一つの試算によると、3 GeV陽子ビームが鉄ターゲットに入射したときのビームに垂直な方向の遮へい体外側における中性子実効線量は、約70%が100 MeV以下の成分によるものであることが示されている<sup>11)</sup>。したがって、放射線防護上は、100 MeV以下の中性子を対象としたモニタや線量計で十分対応可能であると言える。そこで、この要求に応え得るモニタ用検出器の開発に関して研究を行った。

### (1) 数MeV~100 MeV中性子用検出器

中高エネルギー中性子のエネルギースペクトル測定に有機液体シンチレータがよく使われており、その応答関数を精度良く評価する計算コードも整備されている。そこで、モニタ用検出器としてBC501A有機液体シンチレータを用いることを検討した。液体シンチレータ応答関数計算コードSCINFUL<sup>12)</sup>を用いて計算した応答関数と周辺線量当量換算係数に基づき、シンチレータの発光量を線量率に直接変換するスペクトル荷重係数（G関数）を求めた。表1に、様々なエネルギーの中性子場において照射したBC501AにこのG関数を適用して評価した線量当量と中性子フルエンスから計算した参考値の比較を示す。両者は良く一致している。これより、G関数を適用し数MeV～100 MeVの中性子線量当量を測定する方法の基本原理を確立した<sup>4), 7)</sup>。

## (2) 検出エネルギー下限値の拡張の試み

BC501A有機液体シンチレータは、数MeV以下の中性子に対する感度がほとんどない。そこで、シンチレータ中に<sup>10</sup>Bを溶かし込み、シンチレータ内で減速した中性子を<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li反応で捕らえ、放出されるα線による発光を線量に変換する方法によって、検出範囲を低エネルギー側に拡張する試みを行った<sup>6), 7)</sup>。しかし、熱エネルギーまで検出範囲を拡張できたものの、α線の発光端が低く発光量も少ないために、γ線混在場では中性子の弁別が困難であることが判明した。

次に、ウェル型液体シンチレータの中心に<sup>6</sup>Liガラスシンチレータを設置し、減速した中性子を<sup>6</sup>Li(n, α)<sup>3</sup>He反応で捕らえる方法を検討した<sup>5), 7)</sup>。モンテカルロ放射線輸送計算コードMCNP-4B<sup>13)</sup>を用いて、1 MeV以下の中性子入射に対する反応率を計算した。また、任意形状液体シンチレータ応答関数計算コードSCINFUL-CG<sup>14)</sup>を用いて計算した応答関数に基づきG関数を計算した。これらの計算結果に基づいて設計し試作した複合型検出器を図1に示す。この複合型検出器を様々なエネルギーの中性子場で照射して求めた線量応答特性を図2に示す。数MeV以上では、上述の液体シンチレータ単体の場合と同様に、周辺線量当量とほぼ等しい応答特性が得られた。熱エネルギー～約10 keVの範囲では、周辺線量当量より大きな応答を示す。しかし、逆に約10 keV～数MeVの範囲では、小さめの応答となるため、この範囲の応答を改善する必要があることが判明した。

## (3) 検出器の小型・軽量化の試み

上で試作した複合型検出器の特性試験の結果より、熱エネルギー～100 MeVの広帯域エネルギーに適用できる中性子モニタの開発の可能性が示された。そこで、次にモニタの線量応答特性を改善し、さらに小型・軽量化する試みを行った。図3に示すように、<sup>6</sup>Li含有ZnS(Ag)シートを液体シンチレータの外周に巻いたホスウィッチ型検出器を試作した。検出器に入射した光子及び数MeV以上の中性子は、シンチレータ中でそれぞれ電子及び反跳陽子を生成しシンチレータを発光させる。また、熱中性子はZnS(Ag)シート中の<sup>6</sup>Liに捕獲され、<sup>6</sup>Li(n, α)<sup>3</sup>He反応で生成されるα線がZnS(Ag)シートを発光させる。光子、速中性子、熱中性子によって引き起こされる発光の減衰時間は、それぞれ約10 nsec、100 nsec、3 μsecである。このため、図4に示すように、光電子増倍管からの出力波形の違いから入力粒子を弁別できると期待される。<sup>252</sup>Cf及び<sup>241</sup>Am-Be中性子源を用いて、これらの弁別特性を試験した結果、これらの3つの成分を明確に弁別することができた。

次に、SCINFUL-CGコードを用いて応答関数を計算し測定結果と比較したところ、図5に示すよ

うに、極めて良い一致が得られた。さらに、この結果に基づきG関数を計算した。このG関数を適用して、 $^{252}\text{Cf}$ 及び $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源、40.3 MeV中性子入射に対する線量評価を行ったところ、表2に示すように、中性子フルエンスから計算した値とほぼ一致した。これらの結果より、本ホスウィッチ型検出器は広帯域エネルギーの中性子に適用可能なモニタの検出器として、十分な性能を有することが実証された。

#### (4) 今後の開発の方向

ホスウィッチ型検出器のエネルギー特性をさらに改善するために、 $^6\text{Li}$ 含有ZnS(Ag)シートを液体シンチレータの内側に配置するなどの工夫を行う。また、100 MeV以上の中性子に対する応答関数を計算し、より高いエネルギーにまで適用範囲を拡大する。さらに、光子入射による発光量を線量に変換する方法を開発し、 $\gamma$ 線モニタとしての機能を付加する検討を行う。

### 4. おわりに

平成12年度から3年間にわたるプロジェクト共同研究により、中高エネルギー中性子の線量評価・線量測定に関する多くの知見が得られるとともに、今後取り組むべき課題が整理され明確になった。また、加速器施設における核破碎核種の内部被ばく線量評価に必要な情報が得られた。今後は、高エネルギー加速器施設の運転時の放射線安全の確立に向けて、研究を継続発展させる予定である。

### 参考文献

- 1) M. Ibaraki, M. Baba, T. Miura, T. Aoki, T. Hiroishi, H. Nakashima, S. Meigo and S. Tanaka: J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2, 405 (2002).
- 2) T. Sanami, T. Hiroishi, M. Baba, M. Hagiwara, T. Miura, T. Aoki, N. Kawata, S. Tanaka, H. Nakashima, S. Meigo and M. Takada: J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2, 421 (2002).
- 3) Y. Nakane and Y. Sakamoto: Nucl. Instr. and Meth., A 459, 552 (2001).
- 4) E. Kim, A. Endo, Y. Yamaguchi, M. Yoshizawa, T. Nakamura and T. Shiomi: Radiat. Prot. Dosim., 102, 31 (2002).
- 5) 金ウンジュ, 遠藤 章, 山口恭弘, 吉澤道夫, 中村尚司, Danielle R.D. RASOLONJATOVO: 日本原子力学会和文論文誌, 1, 317-319 (2002).
- 6) A.H.D. Rasolonjatovo, T. Shiomi, E. Kim, T. Nakamura, T. Nakamura, T. Nunomiya, A. Endo, Y. Yamaguchi and M. Yoshizawa: Nucl. Instr. and Meth., A 492, 423 (2002).
- 7) 金ウンジュ, 遠藤 章, 山口恭弘, 吉澤道夫, 田中 進, 潮見大志, 中村尚司, Danielle R.D. RASOLONJATOVO: JAERI-Tech 2002-041 (2002).
- 8) K. Oda, H. Ichijo, N. Miyawaki, T. Yamauchi and Y. Nakane: Radiation Measurement, 34, 171 (2001).
- 9) K. Oda, Y. Saito, N. Miyawaki, T. Yamauchi, A. El Rahmany, Y. Nakane and Y. Yamaguchi: Radiat. Prot. Dosim., 101, 569 (2002).

- 10) A. Endo, H. Noguchi, S. Tanaka, Y. Oki, T. Iida, K. Sato and S. Tsuda: Appl. Radiat. Isot., 56, 615 (2002).
- 11) 宮本幸博, 池野香一, 秋山茂則, 原田康典: JAERI-Tech 2002-086 (2002).
- 12) S. Meigo: Nucl. Instr. and Meth., A 401, 365 (1997).
- 13) J.F. Briesmeister: LA-12625-M (1997).
- 14) 金ウンジュ, 遠藤 章, 山口恭弘: JAERI Data/Code 2001-207 (2001).

### 主な質疑応答

J-PARC計画を踏まえて、熱エネルギーから100MeV領域に適用可能な高エネルギー中性子モニター用検出器を開発してきた。保健物理あるいは人間とエンジニアリングの関係から、将来の方向として医療分野とのコミュニケーションの重要性が示された。以下に主な質疑応答を記す。

Q : 研究会等を開いて、イメージ合わせをやりながら進められている。成果も出つつあり、基本的には断面積測定という物理過程からきちんと積み上げられており、いわゆる他人のデータをもらって評価することはしないという毅然たる態度でやっておられる。かなり密度濃くミーティングされていて、前と後でどの様に状況が変わったのか。

A : 4回研究会を開いた。プロジェクトが始まる前に1回開催し、関係者全員が集まってどういうチームでどういうテーマに取り組むかを議論した。1年経って実験が終わった後に研究会を開催し、結果に対して違う見方があると意見を取り入れて修正し、例えば「その測定ならうちの方が得意だよ」というようなことがあれば、その次の年には参加協力してもらうことをやってきた。研究会の成果はこのような例として挙げることができる。

Q : 委員会の時もこの点について常に願いしており、とにかくイメージ合わせして、落とすのではなくて方向を揃えるというようにお願いして丁寧にやっていただいたと思っている。評価の精度についてどの程度まで見積もれれば実用までいけるのか、また学問として特に放射線安全管理学のような方向へ持っていくにはどうゆうところの取り込みをやっていけばよいのか。

A : 評価精度は、通常の原子炉RIでの線量の評価精度もそれほど高くない。勧告などでは、せいぜいファクター2くらいに合わせてくださいといわれるが、それからいくと本日説明したモニターは、ファクター2よりもっと小さい精度が期待できるので、有望と考えている。それから方向としては、保健物理は人間を防護するというように人間を対象にしているが、本日説明したように保健物理は人間とエンジニアリングの融合点にあるといえる。

Q : 医学関係などとも将来的にコミュニケーションを取るつもりか。

A : 今のところ予定はないが、良い指摘なので、そうゆう分野へも目を向けていきたい。

表1 有機液体シンチレータにG関数を適用して評価した線量当量

中性子源	G関数を適用した評価 結果 $H_G$ (pSv cm <sup>2</sup> )	フルエンスからの計 算結果 $H_S$ (pSv cm <sup>2</sup> )	比 ( $H_G/H_S$ )
$^{252}\text{Cf}$	* $1.57 \times 10^{-3}$	* $2.48 \times 10^{-3}$	0.63
$^{241}\text{Am-Be}$	* $2.107 \times 10^{-3}$	* $2.83 \times 10^{-3}$	0.74
2 MeV (東北大FNL)	$1.88 \times 10^2$	$4.20 \times 10^2$	0.45
15 MeV (東北大FNL)	$5.71 \times 10^2$	$5.40 \times 10^2$	1.06
41 MeV (TIARA)	$8.41 \times 10^2$	$9.67 \times 10^2$	0.87
65 MeV (TIARA)	$1.08 \times 10^3$	$1.08 \times 10^3$	1.00

\*印は、1 MeV以上の中性子成分に対する中性子1個当たりの線量

表2 ホスウィッチ型検出器にG関数を適用して評価した線量当量

中性子源	G関数を適用した評価 結果 $H_G$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	フルエンスからの計 算結果 $H_S$ ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	比 ( $H_G/H_S$ )
$^{252}\text{Cf}$	1.34	1.49	0.90
$^{241}\text{Am-Be}$	21.2	24.3	0.87
40.3 MeV (TIARA)	11.9	11.2	1.06

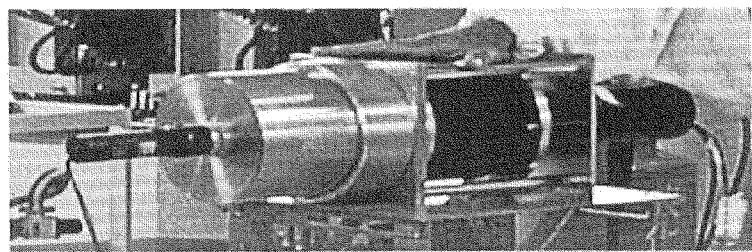


図1 有機液体シンチレータと $^6\text{Li}$ シンチレータの複合型検出器

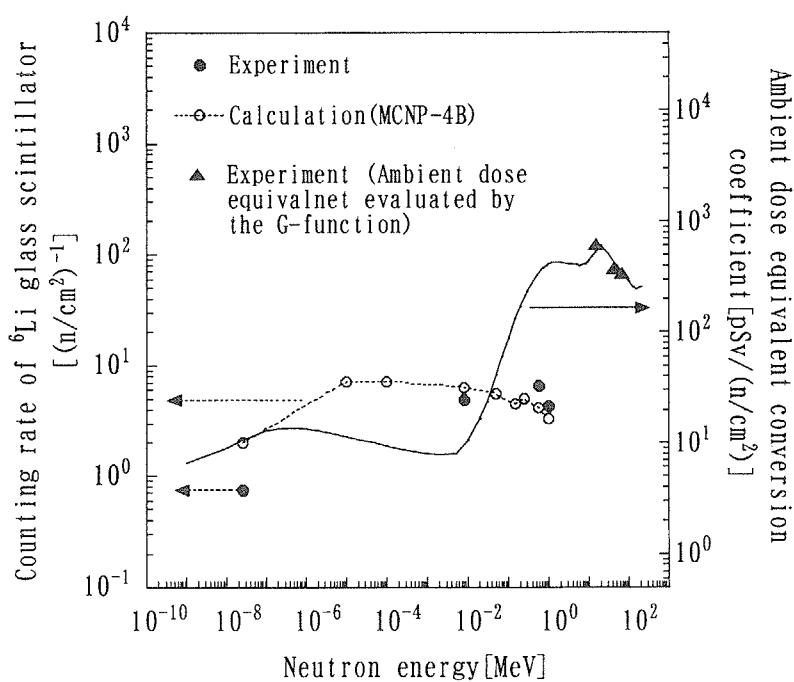


図2 複合型検出器の線量応答特性

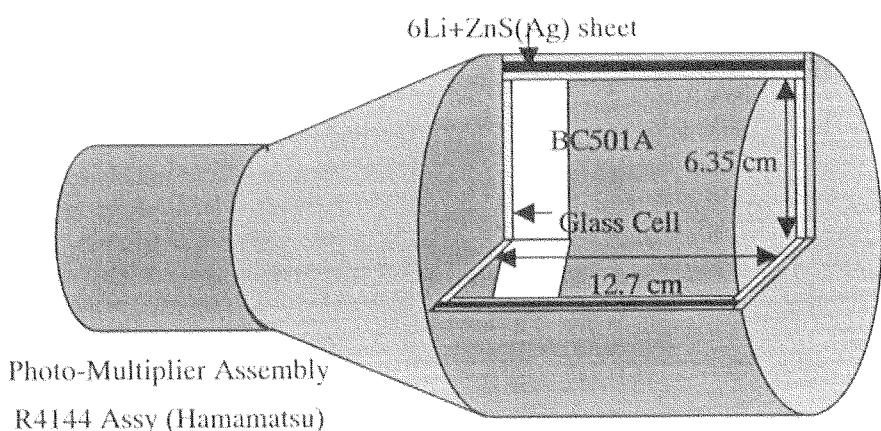
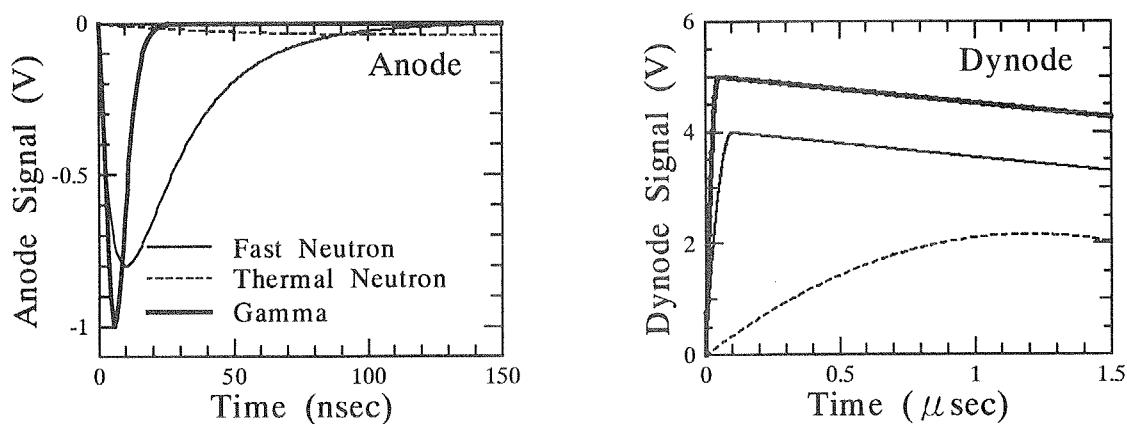
図3  $^{6}\text{Li}$ 含有ZnS(Ag)シートを液体シンチレータに巻いたホスウィッチ型検出器

図4 ホスウィッチ型検出器のアノード及びダイノード信号の形状

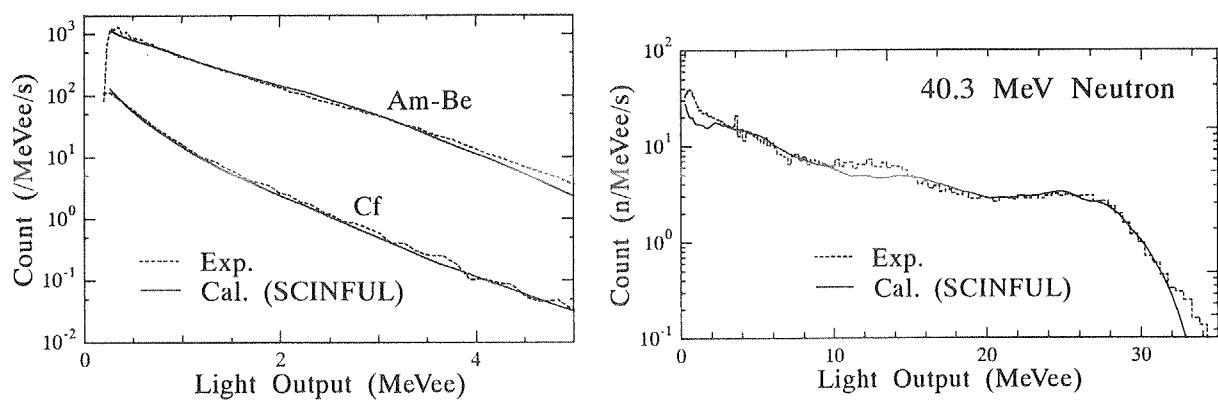


図5 ホスウィッチ型検出器の応答関数の計算と実験の比較

## 2.2.3 材料照射損傷に対する核変換生成物の影響に関する研究

實川資朗<sup>1</sup>、関村直人<sup>2</sup>、向田一郎<sup>3</sup>、下村義治<sup>4</sup>、大貫惣明<sup>5</sup>、香山晃<sup>6</sup>、長谷川晃<sup>7</sup>、若井栄一<sup>1</sup>、三輪幸夫<sup>1</sup>、根本義之<sup>1</sup>、沢井友次<sup>1</sup>、内藤明<sup>1</sup>、安堂正巳<sup>1</sup>、広瀬貴規<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>原研、<sup>2</sup>東大、<sup>3</sup>広大、<sup>4</sup>広工大、<sup>5</sup>北大、<sup>6</sup>京大、<sup>7</sup>東北大

### 1. はじめに[1, 2]

核融合炉や核破碎中性子源のように中性子のエネルギーが高い場合、或いは、材料によっては軽水炉炉心等で長時間使用すると、高いレベルの弾き出し損傷(数10? 数100dpa)とともに、核変換反応で生じる多量のHeやH原子(数100? 数1000ppm)が材料に導入される(図1参照)。

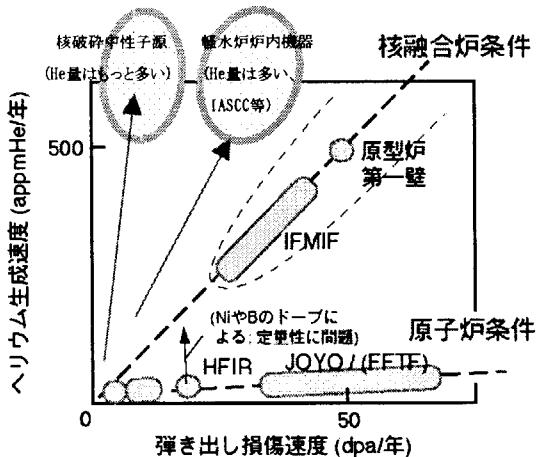


図1 機器によるHe/dpaの違い

TIARAが建設されている頃、或いはそのしばらく前から、原研、大学さらに国外の研究機関により、中性子照射等による弾き出し損傷と核変換生成物(He等)が同時に材料に作用すると組織変化の速度が著しく増加すること等が核融合炉材料研究を中心に見いだされ始めた。TIARAの特徴に多重イオンビームによる照射実験があるが、この目的の一つには、この「同時作用効果」の解明がある。このような経緯もあり、プロジェクト共同研究(平成9年から)以前から、この課題に関係する研究を行ってきており、その成果を基に共同研究が立ち上げられた。

プロジェクト共研以前には、Heの予注入、2重及び3重ビーム照射をもちいて(並行して原子炉照射等)、オーステナイトステンレス鋼のスウェーリング挙動等へのHe/dpa(He注入速度と弾き出し損傷速度の比)の重要性やボイドの核生成へのHe等の効果について検討を行った。その結果、例えば、予注入と同時注入とでは、キャビティー密度の違い等を通して大きな違いが生じることや、キャビティーと転位のシンク強さの比が、照射によるミクロ組織変化の速度を支配すること等を示した。

エネルギーが高い中性子で照射するとHe以上にHが導入されるが、このHを含めた評価が進んでいなかったこと、また、核融合炉材料等では低放射化の要求から、対象材料が低放射化フェライト/マルテンサイト鋼、バナジウム合金、セラミックス(SiC/SiC複合材料等)等に拡がったこと、これらの材料での照射損傷課題がボイドスウェーリングばかりでなく硬化や脆化(ミクロ組織変化の結果である)も重要であること、核分裂炉の炉内構造材料でもミクロ組織変化が引き起こす問題が重要になりつつあること(例えば、照射誘起応力腐食割れ; IASCC)、核破碎中性子源

のような高エネルギー中性子の照射を受ける機器の開発等を考慮して、プロジェクト共研では、

- ・トリプルイオンビーム照射
- ・広範な材料でのミクロ組織変化機構へのHeやHの同時作用効果の  
横断的理解(照射速度等のパラメータの影響、照射誘起偏析等が含まれる)
- ・強度特性への同時作用効果(ミクロ組織変化の結果である)

以上を重視して計画を進めた。これは各大学や原研の協力の強化無くしては遂行できないため、プロジェクト共同研究とした。

ところで、上記の項目でのポイントは、ミクロ組織変化に対するHeやHの効果を含めた、照射パラメータの影響にある。そこで、スウェーリング挙動を例にとり、これについて概説してから、各成果について紹介を行う。

照射による弾き出し損傷により、v(原子空孔)とi(格子間原子)が生じるが、この反応は反応速度式により、以下のように表現される。

$$\frac{dC_i}{dt} = K - k_{vi} C_i C_v - k_{si} C_s i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_v}{dt} = K - k_{vi} C_i C_v - k_{sv} C_s v (C_v - C_{v0}) \quad (2)$$

ここで、 $C_i, v$ は*i, v*の濃度、 $C_s$ はシンクの濃度、 $C_{v0}$ は熱平衡*v*の濃度、 $k_i, v$ は反応速度( $Z_i, v$ )、 $D$ は拡散係数である。スウェーリングは、ボイド(或いはキャビティ)に原子空孔が流入することで生じるが、弾き出し過程では、*v*と*i*が同数生じるため、ボイドが成長するためには*v*を過剰にする機構が存在するはずである。材料中の転位は、*i*を優先吸収するため、*v*が余り、このためスウェーリングが生じる。この優先吸収の度合いがバイアスと呼ばれる(図2参照)。バイアスにより生じる余剰の*v*によるボイドの成長速度は次式で表わされる。

$$\frac{dr}{dt} = Q/r (Z_{id} Z_{vc} - Z_{vd} Z_{ic}) A \quad (3)$$

ここで、添字の*d*は転位を、*A*は転位のシンク強度とボイド(キャビティ)のシンク強度の比率(*Q*ファクター)の関数である(図3参照)。

このように、He等の作用でボイドが生成していれば、転位に*i*が優先吸収されることで余剰になった*v*が、そのボイドに流れ込んでボイドが成長しスウェーリングが生じることになる。ところで、He/dpaが大きすぎボイドの数が多くなりすぎると、転位に行く点欠陥の割り合いが低下するので、バイアスの効きが低下する。この結果、かえってスウェーリング速度が低下することになる。TIARA照射に少し先行し、或いは並行して、原研とORNLのHFIR共同照射実験等からも、このような結果が得られ、このようなモデルの枠組みが提案された。なお、*Q*ファクターへの依存性であるが、1に近いか少し大きい時に、スウェーリングが最大になり、照射量依存性は概ね照射量の1次関数になる。

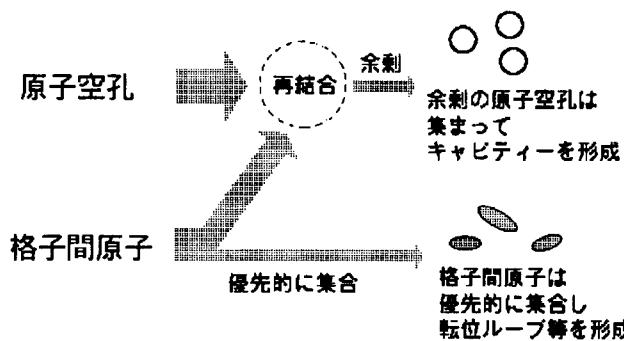


図2 バイアス因子による余剰原子空孔の発生とボイド成長(概念図)

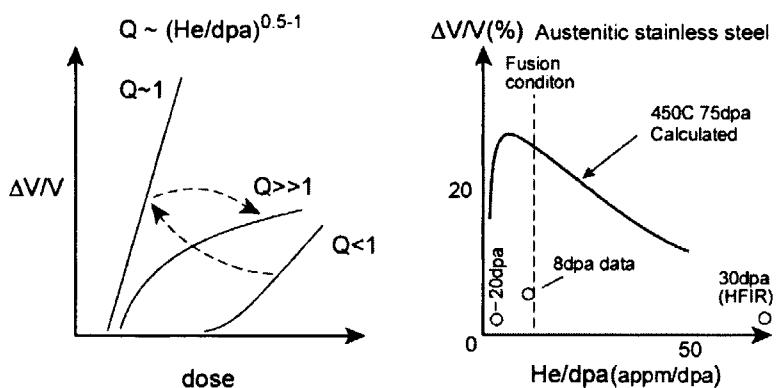


図3 Qファクターとスウェーリング挙動及びスウェーリングへのHe/dpaの影響

## 2. スウェーリングへの弾き出しとガス原子(He及びH)の同時作用効果

### 2.1 純金属(銅及びバナジウム)のスウェーリング(向田、下村他)[3-6]

純銅に銅イオンとHeイオン或いはHイオンを同時注入しキャビティの生成挙動を評価した。既に1で説明したようにHeイオンは固溶限が低いことからも想像されるように、キャビティの形成を助長した。これに対して、Hイオンの同時注入ではキャビティ生成の助長の度合いは大幅に低くスウェーリングは小さめであった。特に、温度が比較的低い場合には銅イオンのみの場合に比べてキャビティ成長を抑制する傾向が見られた(vがHをトラップしたためと考えられる)。

一方、純バナジウムにNiイオンを照射した場合、表面付近にはキャビティが生じたが、イオンのレンジ(深さ $1.3\mu\text{m}$ )に近い損傷量が高い領域ではキャビティの生成はほとんど生じず、針状の析出物が形成された。これは針状の析出物がキャビティの成長を抑制したことやBCC金属での低いバイアスによるものと考えられる。これに対してNiイオン及びHeイオンを同時照射すると針状の析出物の生成は減少し、代わって、キャビティが生成した。これは主に針状の析出物の形成をHeが抑制した結果と考えられる(図4参照)。この研究では試料の作製にFocused Ion Beam(FIB)装置を導入した。この技術は、後で示す低放射化フェライト鋼の場合に極めて有効に利用された。

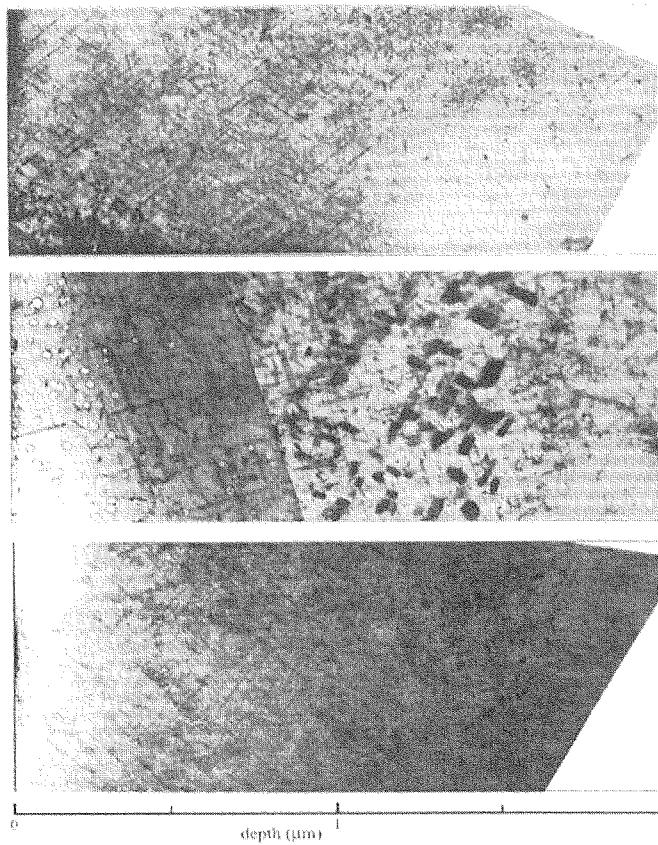


図4 純バナジウム中の損傷組織; (a) 5MeVNi 500°C、(b) Ni 600°C、(c) Ni+0.5MeVHe 600°C

## 2.2 バナジウム合金のスウェーリング(関村他) [7-10]

Heは材料中の固溶限が極めて低いため、照射で生じるvクラスターの中に入りこれを安定化させ得る(例えば1で説明)。一方、HはHeに比べて固溶限が大幅に高いこと、加えて、体心立方合金ではバイアスが小さいため、余剰の原子空孔濃度が低めとなり、この結果Hの効果は2.1のように少ないと想像されていた。

ところが、バナジウム合金に対して行ったNiイオン(12MeV)、He(1MeV)及びH(0.4MeV)の同時照射では、明らかな加速が見出された(図5参照)。さらに、スウェーリング速度も増加した。この機構は、次のように説明された。

- (1) 弾き出しで生じたvは、材料中を移動する間にHeと出会いと結合する。He-v複合体が集まり、キャビティーを生じる。
  - (2) 生じたキャビティーはHe-vを吸収して成長すると共に、内圧が低下する。バイアスが小さいので、自発的に成長を開始する臨界的なキャビティーの径は大きくなり、このためスウェーリングの立ち上がりは遅れる。
  - (3) 一方、注入されたHの濃度が高まると、この集合体はIクラスターの核となり(Heとともに)、ループの形成と転位組織発達を加速することで、過剰なv濃度を上げ、キャビティー自発成長の臨界径を下げるとともに、成長速度を増す(図6(b)参照)。
  - (4) キャビティー内圧の低下とともに、HやH-vがキャビティーに入りはじめ、このためキャビティーの成長速度が高まり、臨界径に達するまでの時間を短縮する(図6(c)参照)。
- 以上のように、材料への固溶をある程度生じるガス元素であっても、転位の状態を変えること

で、スウェーリングを増加させる機構等が生じ得ることを見出した。

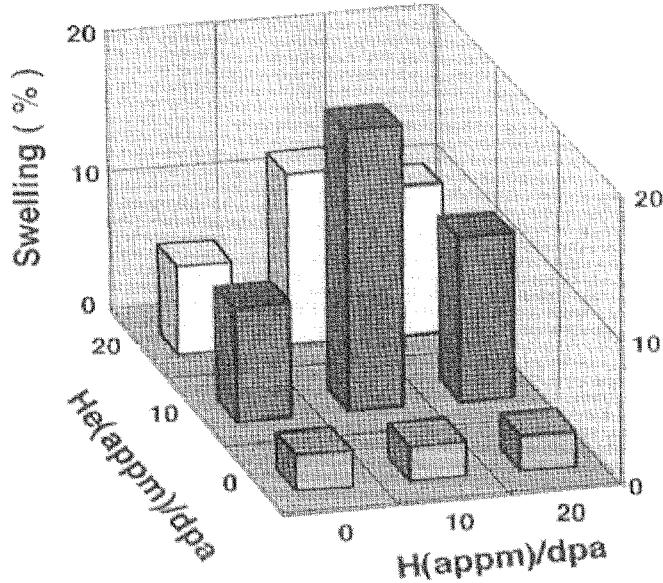


図5 バナジウム合金でのHe/dpa及びH/dpaのスウェーリングへの影響  
明らかに、Hはスウェーリングを助長した。

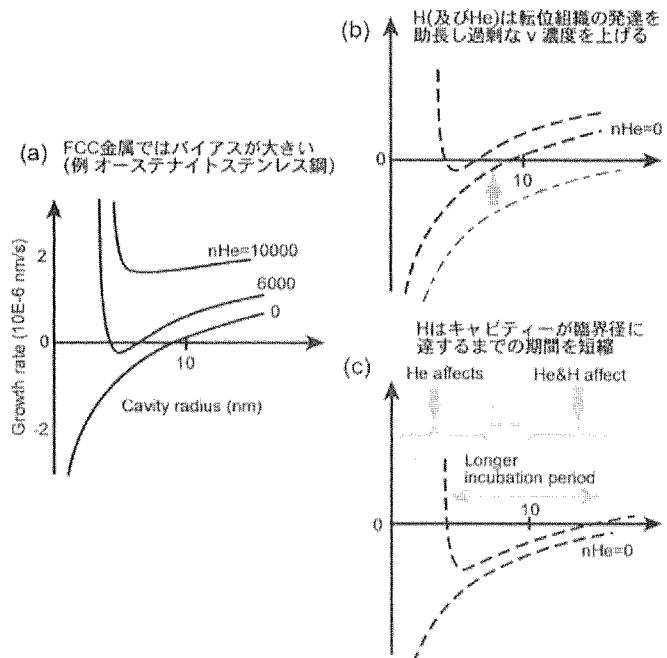


図6 トリプルイオン照射ではHe(及びH)がキャビティ密度を上げるとともに、H(及びHe)が、転位組織発達(ループの形成等)に影響して過剰なv濃度を上げ(b)、さらにキャビティーが臨界径に達するまでの成長を助長し(c)、スウェーリングを増加させる。

### 2.3 低放射化フェライト鋼のスウェーリングとその抑制(若井、沢井、内藤他) [11-14]

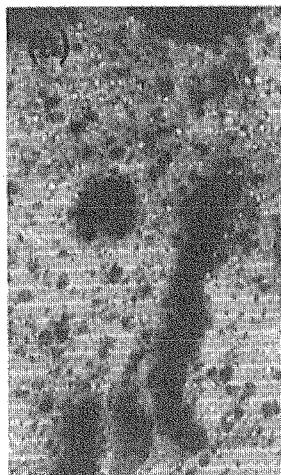
核融合炉等でも重要な低放射化フェライト鋼でのスウェーリング挙動への効果の評価を開始した。なお、低放射化フェライト鋼は高速炉等での実績から、耐スウェーリング性に優れることが知られている。

バナジウム合金の場合と同様に、Heの同時注入でキャビティの発生が明瞭になり、加えて、

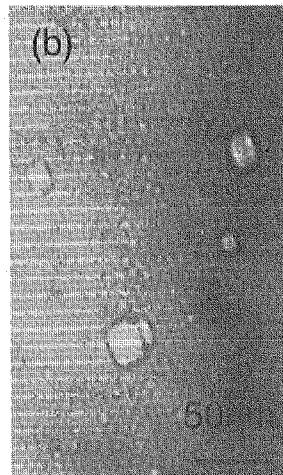
Hの同時注入でスウェーリングはこれが強められた。核破碎中性子源での利用も検討されたことから、核融合炉条件よりもさらにHe等の注入速度(He/dpa等を上げた)が高い領域までの評価を行った。オーステナイトステンレス鋼では、He/dpaが10appmHe/dpa程度でスウェーリングが最大になるが、低放射化フェライト鋼では、さらに高い領域でもスウェーリングが増加する傾向がある結果を得た。これは、この合金では、バイアス効果が比較的小さく、過剰なvの生成速度が小さく、He/dpaによるキャビティーの生成助長の影響が小さかったためである。Hの効果についても同様である。言い換えると、核融合条件程度のHe/dpa等ではQファクターが1よりも小さかったのであろう(「1.はじめに」参照)。なお、バイアスが小さいために、スウェーリング自体は比較的少なめである。

### F82H irradiated in SNS target condition.

Fusion condition

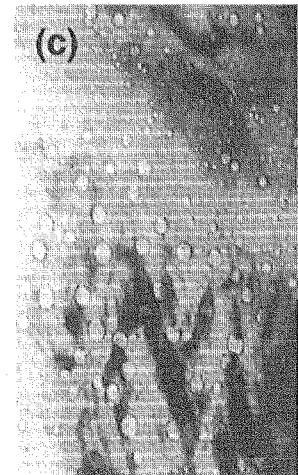


Dual



Triple

SNS target condition



Triple

appmHe/dpa	10	10	~100
appmH/dpa	0	40	~2000

図7 低放射化フェライト鋼におけるキャビティーの発達とHe&H/dpaの影響

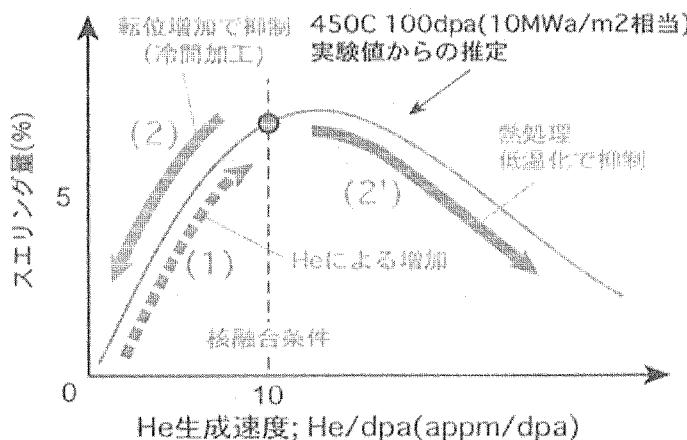


図8 低放射化フェライト鋼におけるスウェーリング抑制の手法

ところで、実用的にはスウェーリングの抑制は意味がある。Qファクターを大幅に低下または増加させることで、スウェーリングを低下させることができることは、これまでのモデルから容易に予測できる(図8参照)。そこで、照射前の熱処理条件や冷間加工条件を変化させ(例えば、冷間加工量を高めて転位密度を増すことで、Qを低下、熱処理温度を下げることで照射生成クラスターの密度を増してQを上昇)、スウェーリングの抑制を試み、これを抑制することができた。

#### 2.4 SiC/SiC複合材料でのキャビティー形成へのHeとHの効果(長谷川、田口他) [15-18]

SiC/SiC複合材料は高温強度及び低放射化の点から核融合炉構造材料としても期待されている。セラミックスの例として、SiC/SiC複合材料でのキャビティー形成へのHeとHの効果を評価した。SiC/SiC複合材料では、照射によって、纖維とマトリクスのスウェーリング量がことなる場合が生じ、これが纖維とマトリクスの間にはく離をもたらし、劣化が生じる。この場合のスウェーリングは、キャビティーの形成では無く、結晶化等を伴う原子の再配列の結果生じるものであるが、He等によってキャビティーが導入されれば、これが助長される可能性がある。

SiC/SiC複合材料では、キャビティーはCVDで形成されるマトリクス領域に生じやすかった。He及びHの同時注入によって、キャビティーの生成は明瞭に助長されたが、影響はHによるものの方が大きかった。これは金属系の材料の場合とは明らかに違う機構が働いていることを示す。なお、セラミックスでも格子間原子型転位ループが生成し成長すること等から、ボイドスウェーリング(バイアス駆動機構による)が生じ得る。機構については現在検討中であり不明な点が多いが、Heに比べて、Hは成分であるSiCを分解し、CやSiと結合する可能性が高いことから、キャビティーの形成に、このような化学反応のポテンシャルの影響があるのではないかと考えている。

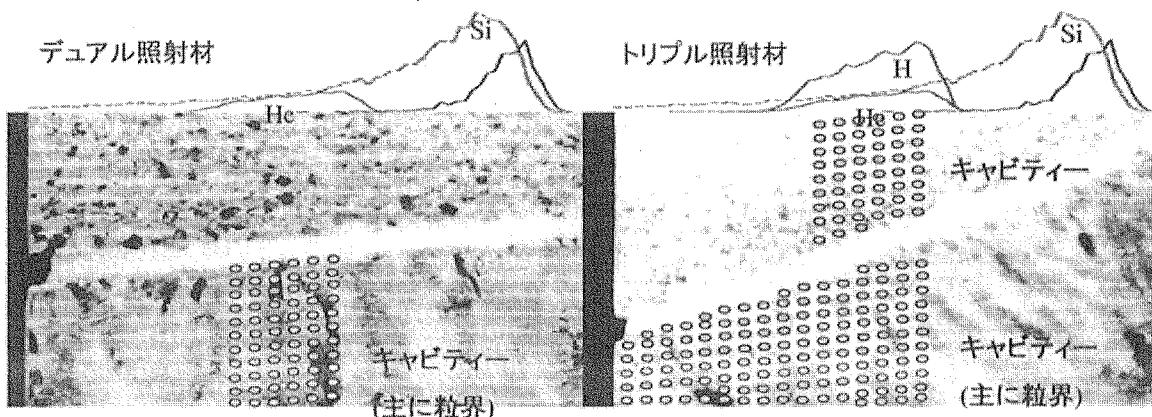


図9 SiC/SiC複合材料中に照射により生じたキャビティーへのH同時注入の効果

### 3. オーステナイトステンレス鋼の組織変化と偏析

#### 3.1 イオン照射下での組織変化への照射速度の効果(関村他) [19-27]

多重イオンビーム照射の重要な役割の一つに、原子炉等の炉心の材料が受ける照射損傷機構の理解と予測のためのモデル及び点欠陥パラメータデータベースの構築が挙げられる。イオン照射と炉心での照射パラメータのうち、最も違いが大きいものの一つに照射速度の違いがある

(もちろん、イオン照射で加速試験が行えることは、これの重要なメリットである)。スウェーリングや照射硬化を支配する転位ループ及びキャビティーの生成と成長に着目して照射速度の影響評価が行われた。

スウェーリングに対する照射速度及び温度への依存性は、照射速度の低下に伴ってスウェーリング量が増すこと。この傾向が高温で強まることを示した(図10参照)。この結果を明らかにするために、キャビティー及び転位ループの形成(数密度)と成長量の関係を得てみたところ(図11及び12参照)、いずれも低損傷速度側でわずかに大きくなることの結果が得られた。この低速度側での増加は、転位ループの核生成が促進され、これがキャビティーの形成及び成長速度の増加をもたらしたものと考えられる。このように、基本的には、転位ループの形成への影響を通じて照射速度効果が生じることがわかるが、例えば、転位ループの密度について原子炉照射の結果と比較すると、照射速度は2桁前後異なるが、数密度は1桁異なり、また速度依存性も逆になっている。組織の照射量依存性を評価して見ると、この違いは、イオン照射のように照射速度が高い場合には、転位ループの核生成が高い照射量まで継続したためであることがわかった。この結果は、速度依存性を評価する場合に、組織変化(この場合は、転位密度)の照射量依存性も一緒に評価する必要があることを示している。そこで、転位ループの形成過程を反応速度論式により評価し、現象が説明できるかどうか確認を行った。ここでは、特に、転位ループの積層欠陥が解消すると(アンフォールト)、照射下での上昇運動の速度が増加することや、可動転位となること(転位網の形成に影響)について、世界ではじめて考慮を行った。その結果、計算により実験結果を再現することができた(図13参照)。

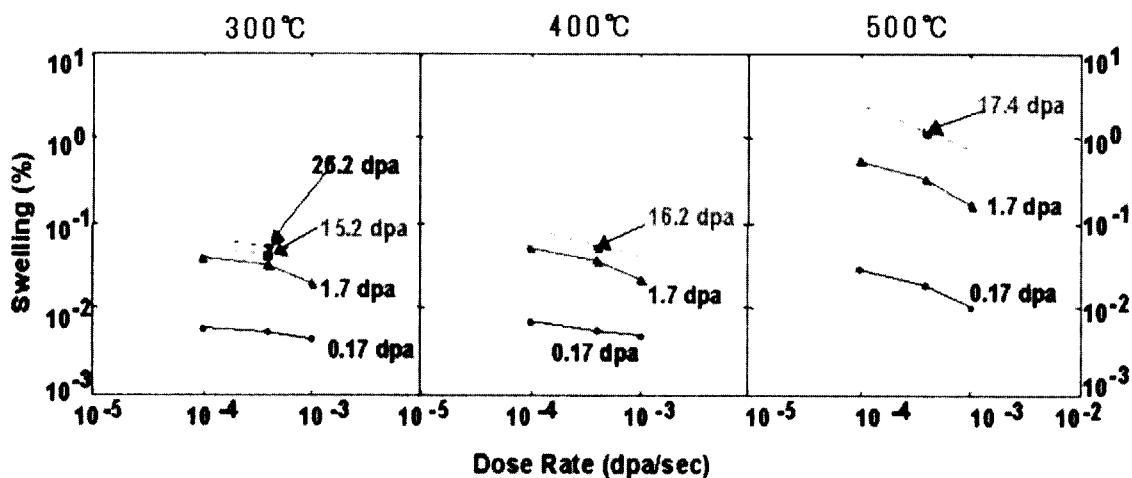


図10 スウェーリングに対する損傷速度の影響

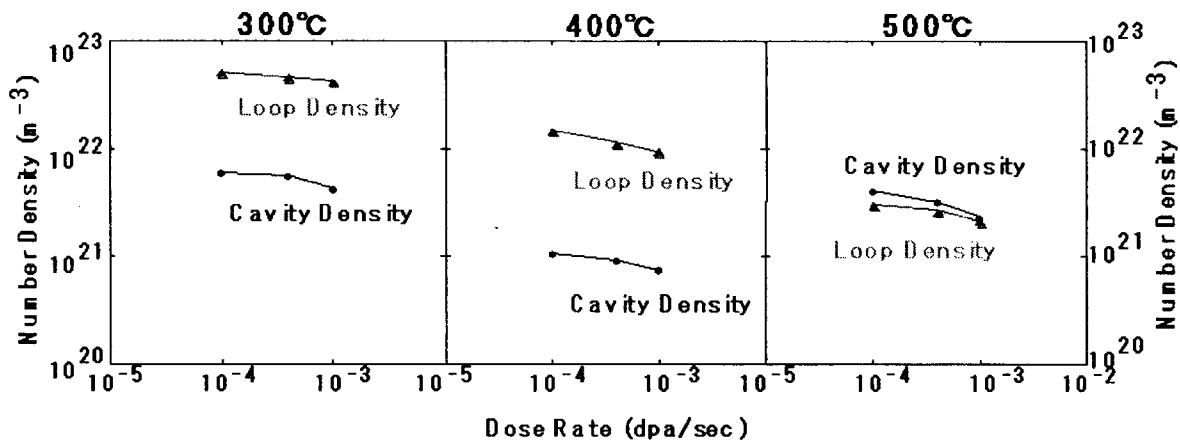


図11 キャビティー及び転位ループ形成に対する損傷速度の影響

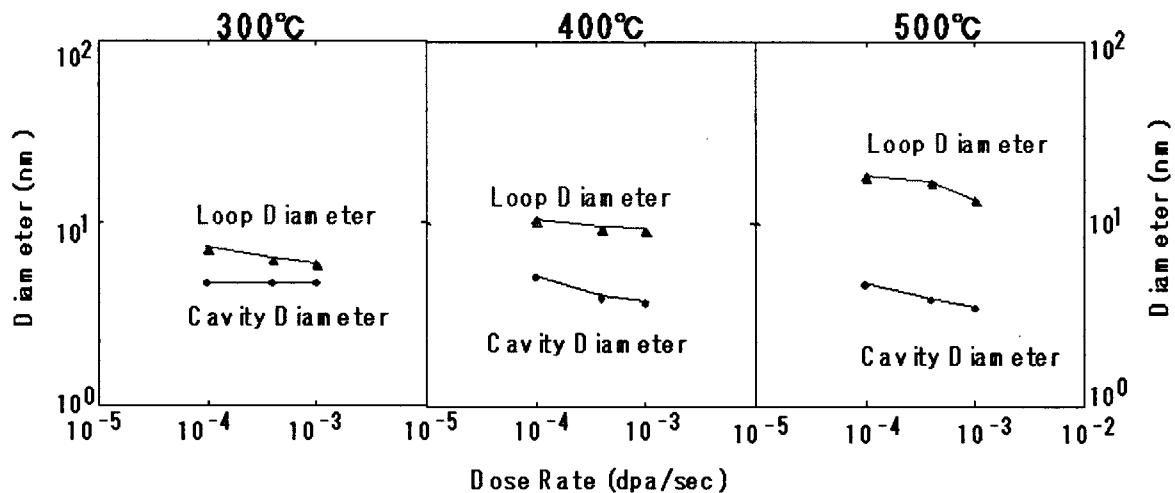


図12 キャビティー及び転位ループの成長に対する損傷速度の影響

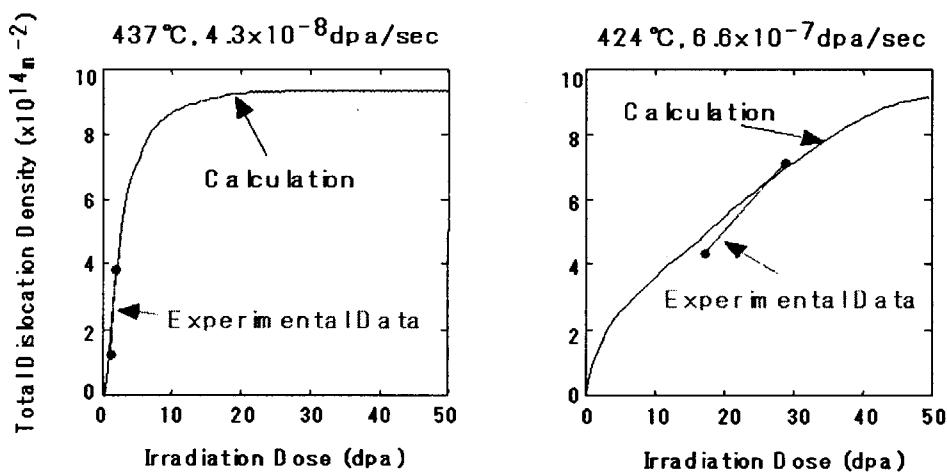


図13 転位組織発達に関する速度論モデルの計算と中性子照射実験の結果の比較

### 3.2 照射による結晶粒界への偏析と耐食性変化(三輪、根本他) [28]

軽水炉高経年化に関する炉心構造物の材料の最大の課題の一つは、照射誘起応力腐食割れ(IASCC)である。IASCCの主要な原因の一つは、照射によって生じる結晶粒界への原子空孔の流れが引き起こす照射誘起偏析であると考えられている。この照射誘起偏析が粒界上にNiを濃縮させCr濃度を減じ、この部分が選択的に腐食されるため、或いは、高Niの領域が水から来るHの存在下で割れを生じるためであるとされている。これまで、イオン照射を使ったシミュレーション照射実験の事例は少なく、せいぜい偏析量の評価程度に留まっていた。しかし、偏析と腐食等の関係を評価しなければ、精度の高い議論をすることはできない。そこで、照射後腐食を行い、粒界近傍に生じる微小領域の腐食量評価を行う手法を開発し、これらの評価を行った(トンネル顕微鏡等の利用による)。その結果、明らかに腐食量が照射損傷量に関係すること等の知見が得られた(図14)。なお、HeやHイオンの影響についても評価を行った。

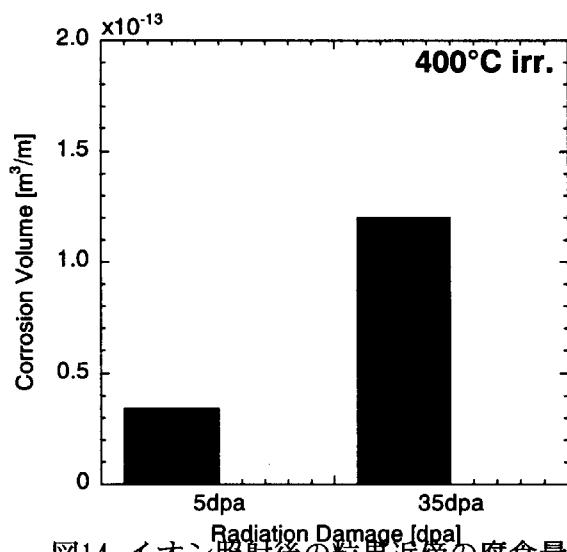


図14 イオン照射後の粒界近傍の腐食量

### 4. 硬さの変化(安堂、沢井、広瀬、香山他) [29, 30]

低放射化の要求が強くなり、フェライト/マルテンサイト系合金、バナジウム合金、SiC/SiC複合材料と言った材料の開発への要求が高くなってきた。これらの材料では、脆性が課題となる場合が多い。脆化には幾つかの機構が存在し、高温では、結晶中の境界(結晶粒界やパケット境界等)に変形中にHe等が集合し割れをもたらしたり、比較的低温では、照射硬化と境界の結合力低下が韌性の低下をもたらしたりする。強度特性の評価、特に、割れの発生には試験片の寸法効果が強く作用するため、主としてHeの影響についてはサイクロトロンを利用して照射実験を行っている。また、硬さによる影響も強いので、これについては多重イオンビーム照射した試料に極微小硬さ試験を行い、評価を行っている。ここでは、これらのうち、多重イオンビーム照射に極微小硬さ試験機を組み合わせて行った、熱処理等による照射硬化低減について紹介する。

比較的低い温度領域での照射硬化は、主に、微細な格子間原子型転位ループが照射下で発生し、これが転位の障害として作用することにより生じる。

$$\Delta \sigma = A(N_1 d)^{0.5}$$

硬化量は、概ね、上式で表わされ、ここで $N_1$ は微細な転位ループの密度、 $d$ は転位ループの大きさである。従って、照射硬化を低減するには、転位ループの発生と成長を抑制すれば良い。

格子間原子型転位ループの生成は、格子間型固溶元素(例えば、C)によって影響を受ける。但し、この作用の元素依存性等は十分に解明されていない。格子間原子型の元素としては、C、H、He等がある。Cの固溶量を低減するように熱処理を工夫すると、照射硬化は減少する傾向を生じた。これに対して、少なくとも、核融合条件程度のH、He/dpaでは、H、Heの影響は強く無かった。但し、He量が1000appm程度に達するようにHe/dpaを大きくすると、影響が見られるようになった。但し、この場合の硬化は、微細なHeを含むキャビティによるものとも考えられる。格子間原子型クラスター等の生成への影響は複雑である。今後は、計算機実験の結果とも比べながら、影響する機構等も明らかにする必要がある。

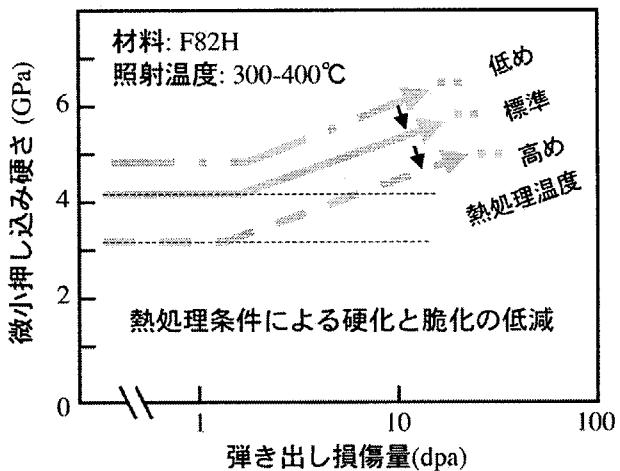


図15 低放射化フェライト鋼における照射硬化の抑制

## 5. まとめと今後の展開

これまで、主に、以下の事柄を明らかにした。

- (1) スウェーリングにおけるキャビティの生成と、未臨界径のキャビティの成長へのHeの影響の機構とQファクターの意義(プロ共研以前から初期まで)
- (2) 上記へのHの助長機構の解明と組み込み(転位組織発達の加速等)
- (3) SiC/SiC複合材料でのキャビティ生成への成分元素と注入イオンの化学的な作用の重要性の指摘
- (4) Qファクター等のモデルを利用した、低放射化フェライト鋼におけるスウェーリングの抑制法の提案
- (5) オーステナイトステンレス鋼結晶粒界での照射誘起偏析と腐食量の関係評価
- (6) 低放射化フェライト鋼における熱処理等による照射硬化の抑制法の提案(照射硬化へのHe等の同時作用効果を含む)

ところで、近年の原子炉材料における照射効果研究では、プラントの高経年化や使用条件の厳しさ(例えば、核融合炉材料)から、使用中の条件変動(温度や荷重等)の影響等、これまで検討されてこなかった事柄についても、それらの影響に関する予測の能力を上げることが要求さ

れてきている。そこで、計算科学的手法、他のシミュレーション照射装置による実験との協力等を含めて、将来的には、照射効果を構造設計や維持基準に合理的に、かつ予測精度高く組み込めるようにするためのデザイン・バイ・シミュレーション(実験値をもとに、照射損傷モデルに基づく計算コードを組み合わせて、外挿性等を与える)に向けた基盤を整備することを目指した共同研究を提案している。この一部分を、TIARA連携研究として提案している。この全体的なロードマップを図16に示す(大学、国研、企業等が参加予定)。

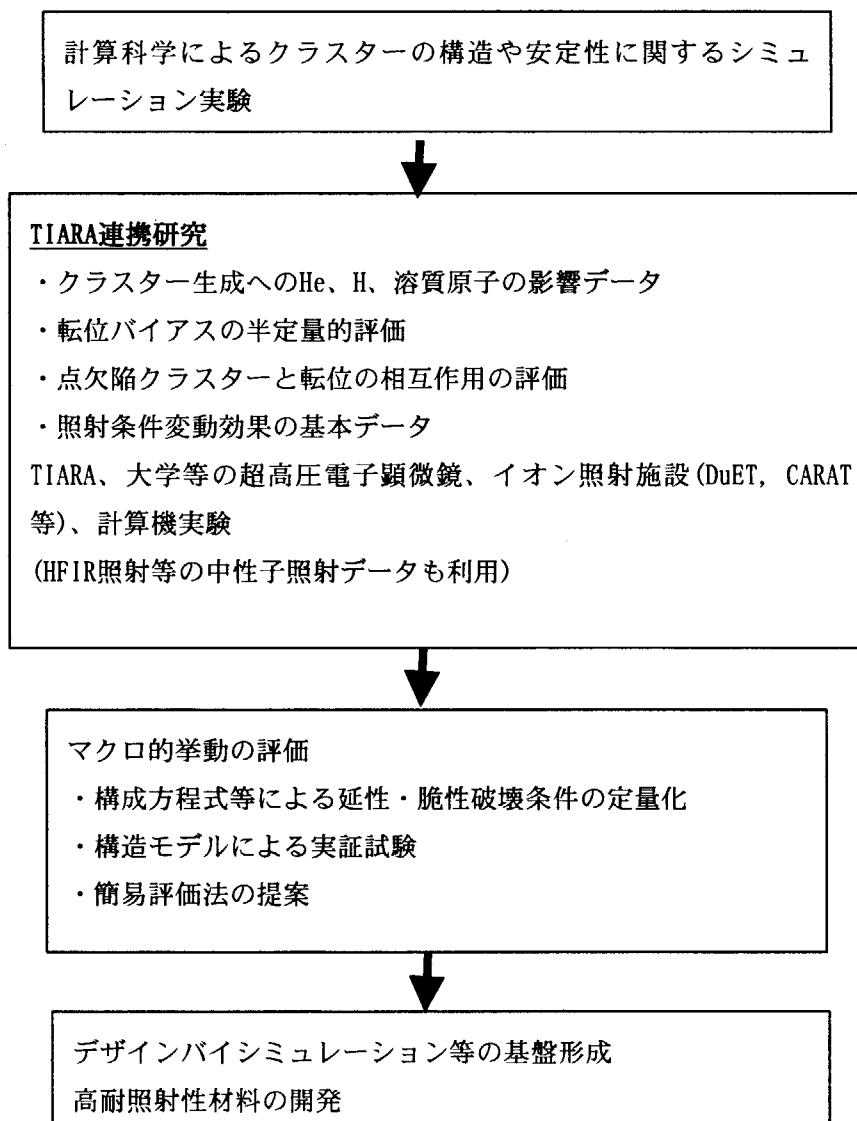


図16 デザインバイシミュレーション等に向けてのロードマップ

## 主な成果(主に、原著論文。なお、プロ共研以外を数件含む)

- [1] 例えば、A. Hishinuma, J.M.Vitek, J.A.Horak and E.E.Bloom, "Effect of preinjected helium on swelling and microstructure of neutron irradiated type 316 stainless steel," ASTM STP 782, 1982, 92-107
- [2] T. Sawai, K. Fukai, S. Jitsukawa, H. Otsu, A. Hishinuma, "Microstructural evolution of He-preinjected austenitic stainless steels under HVEM irradiation," J. of Nuclear Materials.(1994). 212-215. p. 453-457.
- [3] I. Mukouda, et. al., Mat. Res. Soc. Symo. Proc. Vol. 540(1999)549-554
- [4] Y. Shimomura and I. Mukouda, Mat. Res. Soc. Symo. Proc. Vol. 540(1999)527-532
- [5] I. Mukouda, et. al., "Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions," J.N.M. 283-287(2000)302-305
- [6] I. Mukouda, Y. Shimomura, D. Yamaki, T. Nakazawa, T. Aruga, S. Jitsukawa, "Microstructure in vanadium irradiated by simultaneous multi-ion beams of hydrogen, helium and nickel ions," J. of Nucl. Mater., in press
- [7] Iwai, T., Sekimura, N., and Garner, F. A., "Effects of Helium on Large Void Swelling in V-5Fe", Journal of Nuclear Materials 258-263 (1998) pp.1512-1516.
- [8] Iwai, T., Sekimura, N., and Garner, F. A., "Effects of Helium on Void Swelling Behavior of Vanadium Alloys Using Dual Ion Beam Irradiation", ASTM STP 1325 (1999) 1109.
- [9] Sekimura, N., Shirao, Y. et al, "Defect Cluster Formation in Vanadium Irradiated with Heavy Ions", Journal of Nuclear Materials 271&272 (1999) pp.63-67.
- [10] N. Sekimura, S. Yonamine, T. Iwai, Y. Arai, A. Naito, Y. Miwa and S. Hamada, "Synergistic Effects of Hydrogen and Helium on Microstructural Evolution in Vanadium Alloys by Triple Ion Beam Irradiation" Journal of Nuclear Materials 283-287 (2000) pp. 224-228.
- [11] E. Wakai, T. Sawai, K. Furuya, A. Naito, T. Aruga 他6名, "Effect of triple ion beams in ferritic/martensitic steels on swelling behavior." J. Nucl. Mater. (2002) in press.
- [12] E. Wakai, T. Sawai A. Naito and S. Jitsukawa, "Microstructural development and swelling behaviour of F82H steel irradiated by dual ion beams, " J. Electron Microscopy, S239-243(2000)51-
- [13] T. Sawai, E. Wakai, A. Naito, S. Jitsukawa, "Swelling behavior of TIG-welded F82H IEA heat, " J. of Nucl. Mater., in press
- [14] E. Wakai, et. al., "Radiation effects of ferritic and austenitic stainless steels irradiated by dual/triple ion beams, " J.N.M. in press

- [15] T. Taguchi, E. Wakai, N. Igawa, S. Nogami, L. L. Snead, A. Hasegawa, S. Jitsukawa, "Effect of Simultaneous Ion Irradiation on Microstructural Change of SiC/SiC Composites at High Temperature," *J. Nucl. Mater.*, 307-311 (2002) 1135-1140.
- [16] S. Nogami, A. Hasegawa, K. Abe, T. Taguchi, R. Yamada, "Effect of Dual-beam-irradiation by Helium and Carbon Ions on Microstructure Development of SiC/SiC Composites," *Journal of Nuclear Materials*, 283-287 (2000) 268-272.
- [17] S. Nogami, A. Hasegawa, T. Taguchi, K. Abe, R. Yamada, "Surface morphology changes in a SiC/SiC composite as caused by simultaneous triple-ion-beam irradiation," *Materials Transactions*, Vol. 42 No. 1 (2001) 171-175.
- [18] A. Hasegawa, S. Miwa, S. Nogami, T. Taguchi, N. Igawa and S. Jitsukawa, "Study of Synergistic Effects of Displacement Damage, H and He on Mechanical Properties of Advanced SiC/SiC Composites Using Triple Ion-Beam Irradiation," *Fusion and Science Technology*, in press.
- [19] Okita, T., Sekimura, N., and Garner, F. A., "The Effect of Flux and Nuclear Transmutants on Microstructural Evolution and Swelling in Austenitic Model Alloys Irradiated with Heavy Ions and Fast Neutrons", Proceedings of PRICM-4 2002, in press
- [20] Okita, T., Sekimura, N., Satoh, T., Garner, F. A., and Greenwood, L. R., "The Primary Origin of Dose Rate Effects on Microstructural Evolution of Austenitic Alloys during Neutron Irradiation", to be published in *Journal of Nuclear Materials*
- [21] T. Okita, T. Sato, N. Sekimura F. A. Garner, L. R. Greenwood, W. G. Wolfer and Y. Isobe, "Investigation Of The Synergistic Influence Of Irradiation Temperature and Atomic Displacement Rate on the Microstructural Evolution of Ion-Irradiated Model Austenitic Alloy Fe-15Cr-16Ni ", 10<sup>th</sup> International Conference of Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems (2001, August 5-10)
- [22] N. Sekimura, T. Okita, S. Shimakawa and T. Sato, "Dose Rate Effects on Hardening and Microstructure in Irradiated Model Alloys", IGRDM-10 May 20, 2002
- [23] Garner, F. A., M. L. Hamilton, Sencer, B. H., Okita, T., Sekimura, N., et al, "The Surprisingly Large Influence of Displacement Rate on the Swelling of Pure Metals, Fe-based FCC and BCC Alloys, and Vanadium Alloys", to be published in *Journal of Nuclear Materials*
- [24] N. Sekimura, S. Nakamura, T. Okita, T. Iwai, T. Kamada and Y. Arai, "Effects of Dose Rate on Radiation Hardening in Model RPV Steels under Heavy Ion and Fast Neutron Irradiation", Proceedings of the 8th International Meeting on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (1999) pp. 95-124.
- [25] T. Kamada, Y. Wakasugi, T. Okita, Y. Arai and N. Sekimura, "Evaluation of Hardening and Precipitation Behavior in Fe-Cu-Ni Model Alloy and A533B Irradiated with Heavy Ions and Fast Neutrons ", Proceedings of the 8th International Meeting on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (1999) pp. 127-146.

[26] Sekimura, N., Okita, T. et al, "Correlation of Hardening and Defect Cluster Formation in Pure Fe and Fe-Cu Alloys Irradiated with Ions and Fast Neutrons", Proceedings of the 7th International Meeting on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (1998) pp.123-143.

[27] Sekimura, N., et al, "Irradiation Hardening in Ferritic Steels under Heavy Ion Irradiation by Small Indentation Technique", to be published in Journal of Nuclear Materials

[28] Y. Nemoto, Y. Miwa, T. Tsukada and H. Tsuji, "AFM Evaluation for Grain Boundary Corrosion Behavior of Ion Irradiated Stainless Steel", JAERI-Conf / Proceedings of International Symposium on Material Chemistry in Nuclear Environment (Material Chemistry 2002), in press

[29] H. Tanigawa, S. Jitsukawa, A. Hishinuma, M. Ando, Y. Katoh, A. Kohyama, T. Iwai, "Effects of helium implantation on hardness of pure iron and a reduced activation ferritic-martensitic steel, " J. of Nucl. Mater., 283-287(2000) 470-473

[30] M. Ando, H. Tanigawa, S. Jitsukawa, H. Takeuchi, K. Nakamura, Y. Katoh, A. Kohyama, "Evaluation of plastic-deformation behavior on dual ion irradiated reduced activation ferritic/martensitic steels by ultra-micro-indentation technique, " J. of Nucl. Mater., in press

### 主な質疑応答

スウェーリングのデータから、最後の答えまで到達するのは難しい。これは材料が複雑であるために、ボイドやスウェーリングなど複雑になる一方なので、モデル化して基礎データを得るために、新たなアプローチが不可欠である。以下に主な質疑応答を記す。

Q : トリプルビームを用いて多くのスウェーリングデータを取られて、非常に有意義な結果を出されていると思う。しかし、ボイドの解析は非常に難しく、加速照射の時一番知りたいのはリコンビネーションである。ダメージレートが $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ という原子炉より何桁も早いのでリコンビネーションが非常に多くなり、それを決めてさらに、Qファクターはともかく、バイアスとか、その損傷効率も含めて調べないと、どうしてこの様なスウェーリングになっているかなかなか説明できない。説明されたのはヘリウムDPAあるいは水素DPAへの変化に対しての挙動であり、核融合炉条件でのオーステナイトやフェライト鋼のスウェーリングがピークになるデータが示されたが、やはりリコンビネーションが非常に大きいので、簡単でもいいから評価できればよいと思う。それで損傷効率が例えば10%にして、Qファクターが例えば1になっていると、バイアスファクターはこれぐらいだというふうに、最後の答えまでいくのがまだ難しそうだと聞いていたが、この点についての見通しはどうか。

A : ドーズレイトが高くなるとリコンビネーション、セルフリコンビネーションが増え、かつ

同時にニュークリエイションの割合も増えると思う。ご指摘の話は尤もであり、ハイドロジエンが中でどの様な状態となっているか分からぬし、また転位バイアス、これはとても重要な話で蔵本先生もずいぶんおやりになって、我々も計算でもやろうと思っている。こうゆうことを含めて、今言われたようなレベルの話を中心にした連携研究を提案したいと考えている。

C：非常にバラエティーがあるから統一的に見ろと言われても難しいかも知れない。一応モデル化して概ねいけそうだというところまでかなりいっていると思うが、まだオーバービューをちゃんとやれる状況ではないかも知れない。

C：ボイドスウェリングの問題は、バイアスファクターも転位だけでなく、最近は生成バイアスという集合体の一元運動に関するようなものもあって、複雑になる一方である。このためなかなか最終的な答を出すところまでいけないのが現状であるが、基礎データが取られているのは非常に大事なことだと思う。やはりこれからの問題だと認識している。

C：非常に豊かな結果が出ているので、答えも容易に出てくるのではないかと考えていたが、複雑になる一方のような気もする。アプローチとして何かが欠けているのか。

C：やはりまず材料そのものが複雑である。例えば三元系の鉄クロームニッケルとか純銅は非常に単純な金属であるが、リコンビネーションの割合を決めて損傷効率を決めて、それからQファクターが1だったら1のところでバイアスがいくらと、その4つぐらいのことを決めないと全体が記述できないようになっている。バイアスも二種類あるというような現状なので、やはりかなり大変な作業になると思っている。

## 2.2.4 劣化環境下における植物の養分吸収機構の研究

東京大学 森 敏

1. 植物体内外を上方移行する導管水( $H_2^{15}O$ )の移行速度の動画による測定 (東京大学大学院農学生命科学研究科・森敏研究班)

1-1. 過去10年間高崎原研でポジトロン核種を用いて行われてきたPETIS(positron emitting tracer imaging system)の実験では、10秒毎の核種の植物体内移行のピクセル画像を研究者各人が集積して保存している。これまでの投稿論文や、スライドでのプレゼンテーションでは、その画像を時系列に並べてポジトロン核種の植物体内移行を表現して来た(Kume et al, 1997, Nakanishi et al, 1999, Kiyomiya et al, 2001, Kiyomiya et al, 2001)。しかし近年パワーポイントを用いたプロジェクターでのプレゼンテーションが急速に広まり、パソコンの記憶容量が画期的に増えたことにより、動画を表現出来るようになった(ソフトはGIFBuilder 0.4)。そこで、筆者らはこれまでのPETISの画像データの全て( $H_2^{15}O$ ,  $^{52}Fe$ ,  $^{52}Mn$ ,  $^{62}Zn$ ,  $^{11}C$ -メチオニン,  $^{13}NO_3^-$ ,  $^{13}NH_4^+$ )を経時的な動画として観測し直すことにした。一例として、東京大学大学院農学生命科学研究科・植物分子生理学研究室のホームページ(<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/pmp/index.html>)に $H_2^{15}O$ (水)のダイズの茎での移行を示した。これによると水は主茎から分枝が出ているその付け根の部分(節)でいったんとどまって、またつぎの分枝の付け根の部分(節)に飛ぶように(拡散して)主茎の中を移行する。一方導管流(mass flow)としての水はゆっくりと移行している。この葉柄の付け根はこれまで述べてきたイネ科植物の茎と根の付け根の部分であるDC(Discrimination Center)と類似の構造を有する導管や師管が複雑に入り組んだ部分である。ここを水が経由するにはまっすぐな導管を経由するのに比べて時間がかかるので放射能が集積してPETISで感度よく検出される。この「節と節の間の距離」を経過した「時間」で割れば導管中の水の上方拡散速度を確定することが出来る(Koutgen et al, 2001)。このようにして求めたダイズの茎での水の上方拡散速度は7.56 cm/minであった。また導管流は2.02 cm/minであった。これらは世界で初めて定量的に測定された植物体内での水の拡散速度および導管流の速度である。Fig.1には投与後茎の途中まで上昇した $H_2^{15}O$ の像を示した。

1-2. 一本のイネを同一温度下の明処理で $H_2^{15}O$ の吸収実験を行った。その後同じ植物を用いて暗処理条件下で $H_2^{15}O$ の吸収実験を行った。両者の画像データ

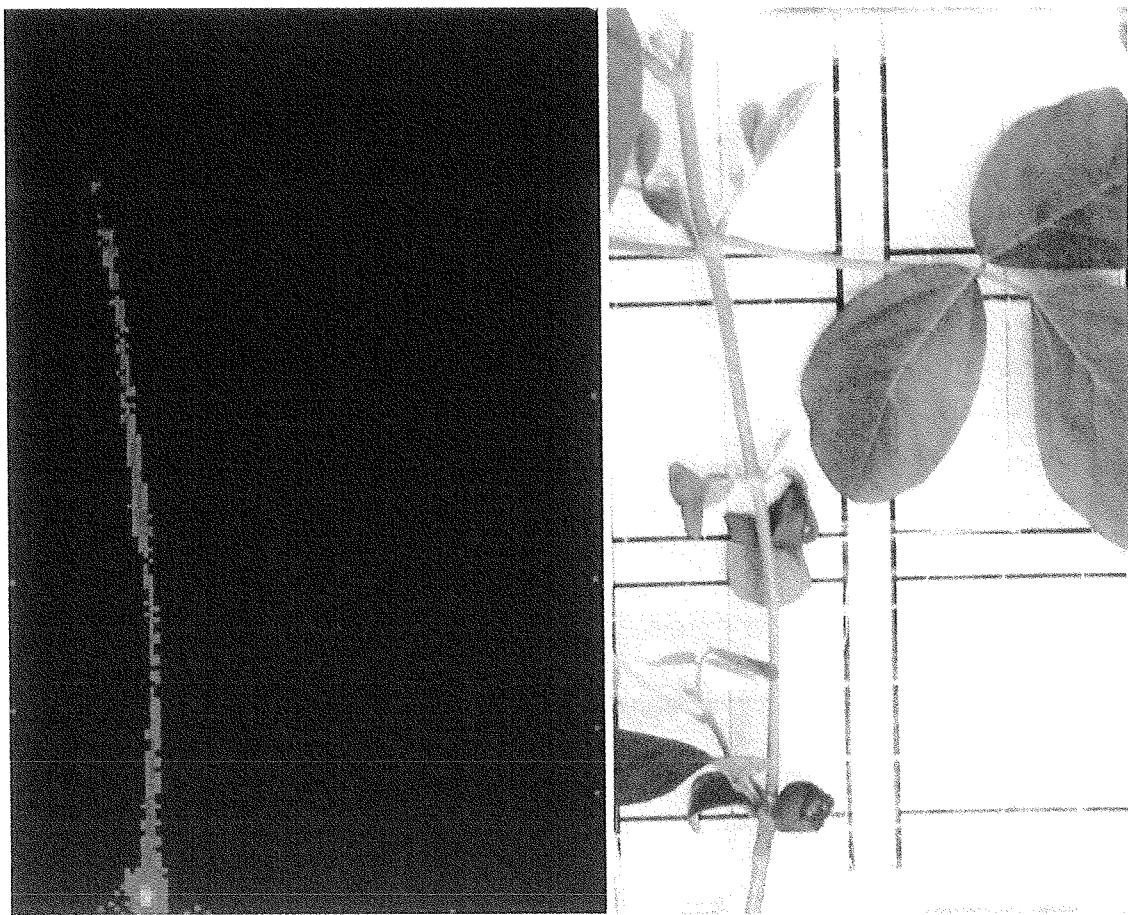


Fig.1 ダイズ体内での水( $H_2^{15}O$ )の上方移行の様相

根から与えた水が約10分後にダイズの茎の途中まで移行していることがわかる。

をコンピューターで同時に作動させた動画を見ると、暗処理では非常にゆっくりしか水が吸収されていない（DCに移行していない）ことがわかった。これも同じくホームページに記載している。この研究論文は*Physiologia Plantarum*（2001年11月号）の表紙を飾った。

1-3. 養分の欠乏や過剰の長期処理が水分吸収に及ぼす影響については根の水チャネルである aquaporin の遺伝子発現との関連で考察がされている (Clarkson et al. 1999)。一方、最近 Zwieniecki らは nature 誌上で「導管内に塩類を直接注入すると水分の上方移行速度が増加すること」を発表した (Zwieniecki et al., 2001)。その理由として導管内壁のペクチン質の収縮によって水の抵抗が減少するためであると説明されている。そこで、森らのグループは、通常水耕栽培で用いる春日井水耕液の塩濃度を変化させて根に与え、イネでの水分 ( $H_2^{15}O$ ) の上方移行速度を測定した。その結果約20倍の春日井氏水耕液濃度で最高速度（蒸留水の場合の約3倍）となることがわかった (Fig.2) (Nakanishi et al. 2002)。この事は、農業上水耕液濃度を変化させることによっても、水の蒸散を制御できることを意味している。異常乾燥時などでは水耕液濃度を極端に下げれば蒸散抑制が可能と考えられる。逆に通常の気象条件下で蒸散を盛んにして養分の吸収移行を促進するためには水耕液濃度を上げると良いと考えられる。ハウスでの点滴灌漑などの作物栽培法ではその植物の生育時期に即した、水

耕液濃度を詳細に再検討検討することによって多収穫をねらった技術開発が期待できる。

2. イネのアンモニア吸収能は炭酸ガス濃度、窒素濃度、体内グルタミン濃度によって制御され

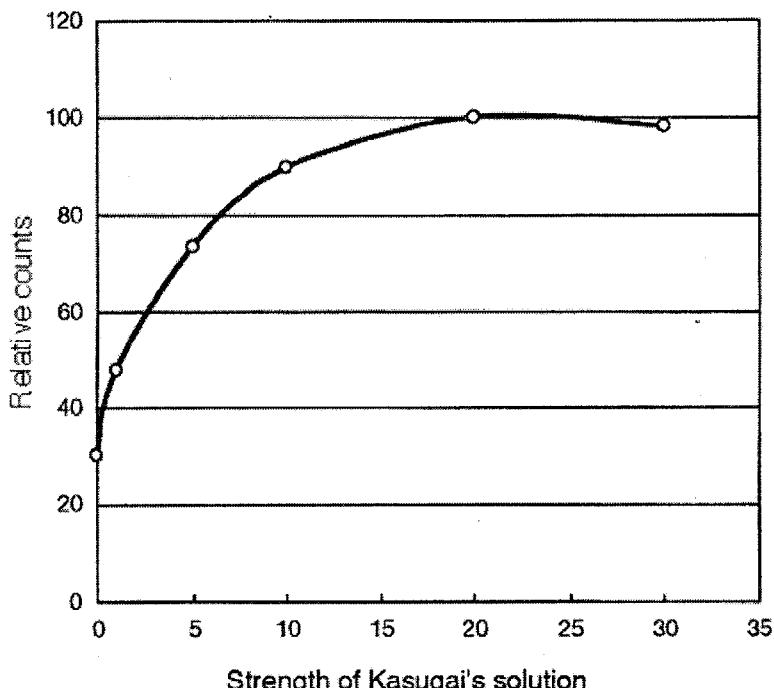


Fig.2 春日井水耕液濃度を変化させた場合のイネ体内での水の上方移行速度

ている（北海道大学理学系研究科 山口淳二研究班）

2-1. イネのアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) は根の細胞膜に存在するアンモニウムイオン・トランスポーター (OsAMT) を経由して細胞質に吸収され、細胞質にあるグルタミン合成酵素 (GS) によってグルタミン酸といっしょになり、グルタミンに合成されることが安定同位元素<sup>15</sup>Nで標識した<sup>15</sup> $\text{NH}_4^+$ を用いた熊澤喜久雄東京大学名誉教授のグループ（熊澤）によって明らかにされている (Fig. 3)。グルタミン合成酵素の阻害剤methioninesulfoximideを水耕液に与えると、イネの根から与えたポジトロン核種である<sup>13</sup> $\text{NH}_4^+$ のDC (Discrimination Center: 根と葉の付け根にある組織)への移行がほぼ完全に押さえられることから、グルタミンそのものが最初の導管への移行形態であることを森らのグループらは明らかにしている (Kiyomiya et al 2001)。山口らは、アンモニア・トランスポーターの遺伝子をイネに導入して過剰発現させた場合のアンモニアの吸収、空気中の炭酸ガス濃度を高めた場合のアンモニアの吸収、生体内C/N比のシグナルと考えられているグルタミンを与えた場合のアンモニアの吸収などをPETIS法で調べた。

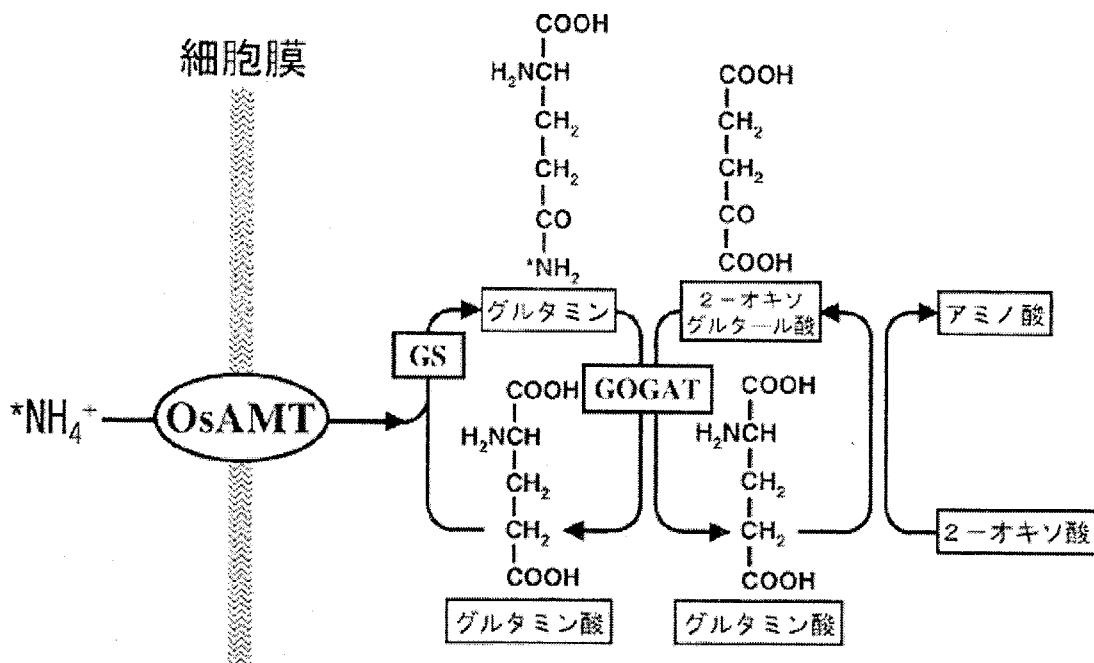


Fig.3 イネの根におけるアンモニウムイオンの同化モデル

2-2. 山口らは最近3種類の *OsAMT* 遺伝子を単離して、そのうちの *OsAMT1;2* をセンスに導入してイネの全身で過剰発現させたイネを作出した (Sonoda Y et al, 2000, 池田 亮ら, 2000)。通常は *OsAMT1;2* と呼ぶ遺伝子は根でのみ発現し、アンモニアによって特異的に遺伝子発現が誘導されることがわかっている。しかしその細胞内局在はまだわかっていない。まずこのイネを用いて、N欠乏処理またはNが十分の条件で育てたイネに  $^{13}\text{NH}_4^+$  を投与した。その結果、前処理チッソの有無に関わらず、アンモニアの吸収 (DCへの移行) が飛躍的に増大した (Fig. 4)。遺伝子導入した *OsAMT1;2* トランスポーターが根で恒常に強く発現しており、与えたチッソがチッソ栄養に影響されないで吸収されていることを証明した。これは遺伝子導入植物に PETIS 法を適用して、導入遺伝子が間違いなく機能していること証明した世界で最初の成果である。

#### 2-3. イネにおける大気濃度のCO<sub>2</sub>処理による窒素取込への影響 (Fig. 5-7)

- ① 播種後3週間水道水で生育後、3週間硝酸アンモニウムを窒素源として水耕栽培したイネ、
- ② ①を3日間窒素飢餓処理を行ったイネ、
- ③ ②を水耕培地に戻し2時間経過したイネ

に対して、 $^{13}\text{NH}_4^+$ の取込をPETISによって解析した。この結果、②の窒素飢餓処理においてのみ顕著な $^{13}\text{NH}_4^+$ の取込が観察されたが③では $^{13}\text{NH}_4^+$ の取込が抑制された (Fig. 5)。このことから通常大気で生育させたイネでは窒素飢餓の後2時間の窒素源の吸収でアンモニアの取込活性を低下させることが示唆された。

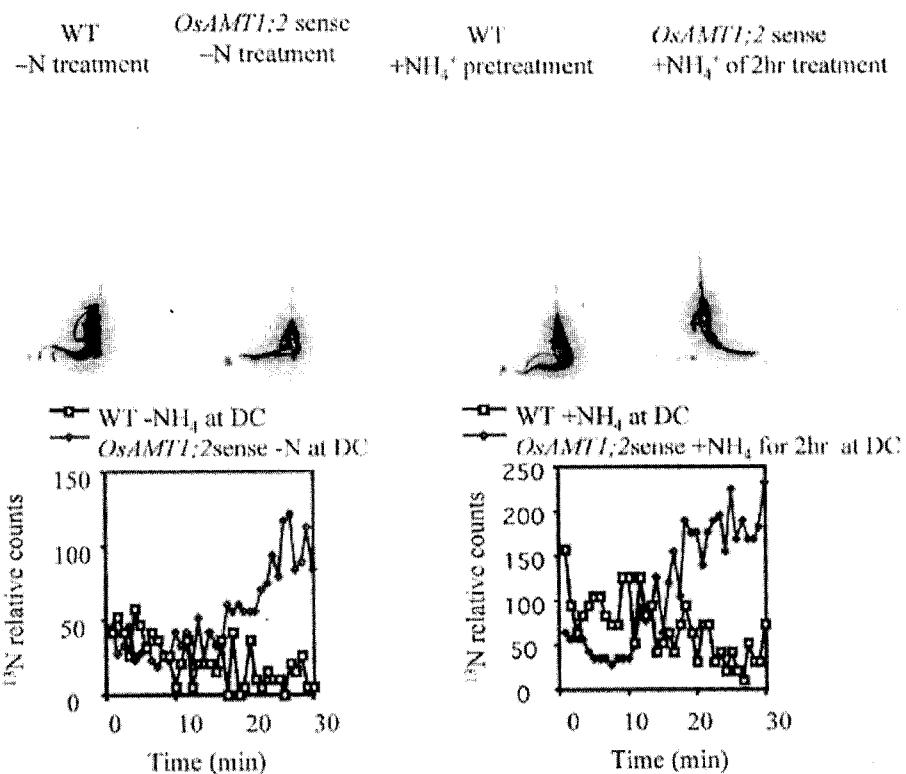


Fig.4 *OsAMT1;2* sense形質転換イネを用いた $^{13}\text{NH}_4^+$ の吸収解析

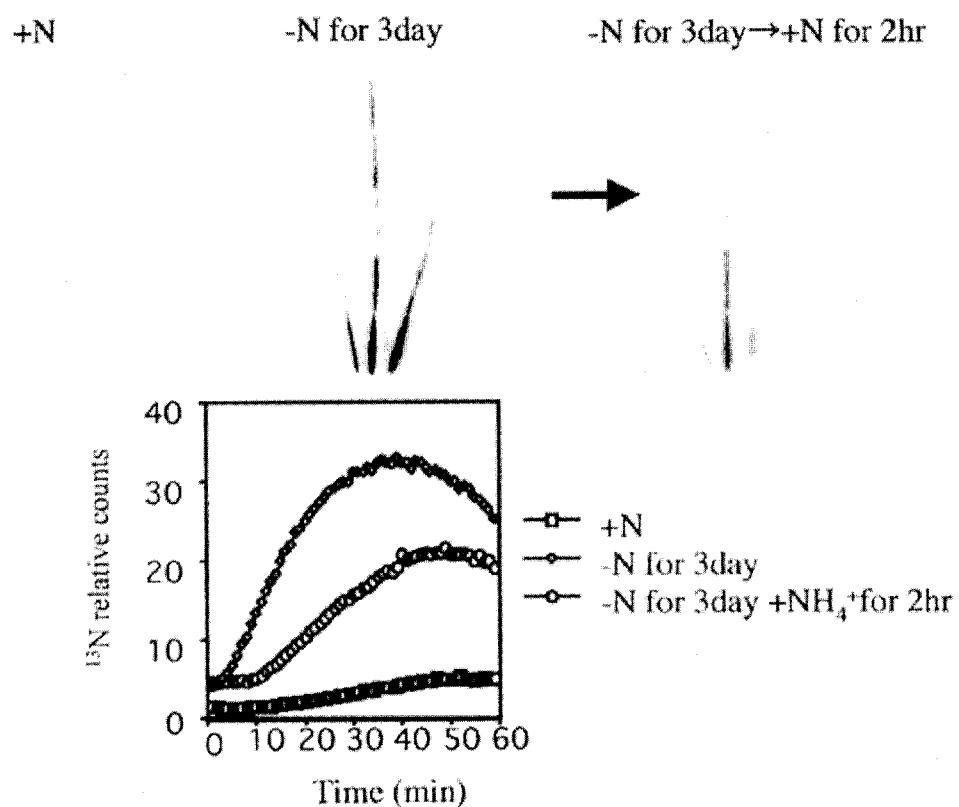


Fig.5 窒素処理による $^{13}\text{NH}_4^+$ 吸収への影響

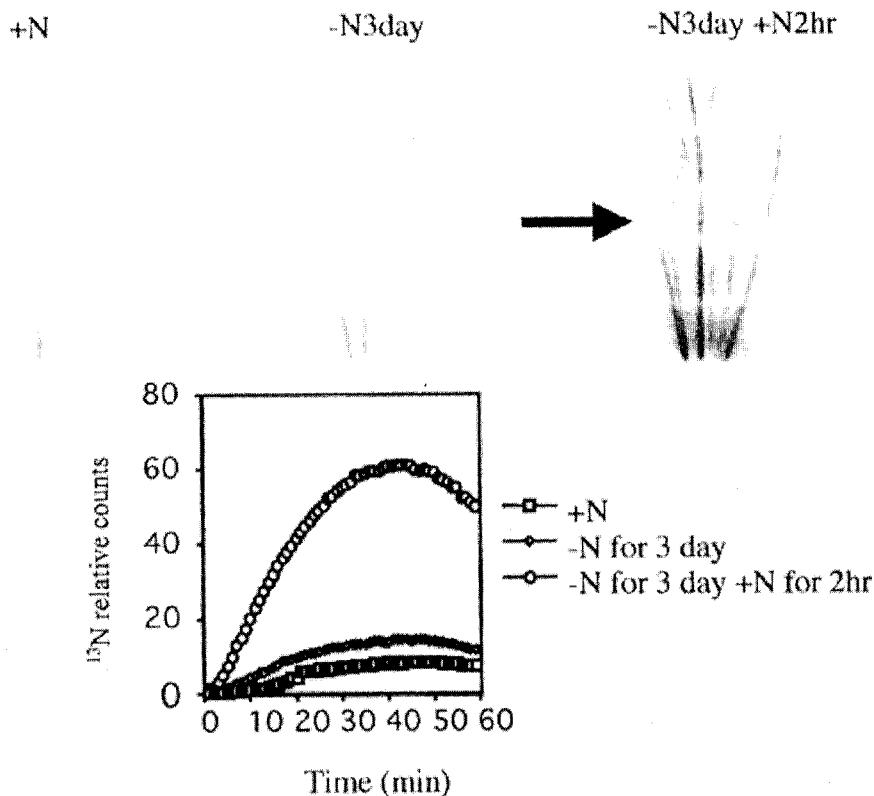


Fig.6 高CO<sub>2</sub>下における窒素処理による<sup>13</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>吸収への影響

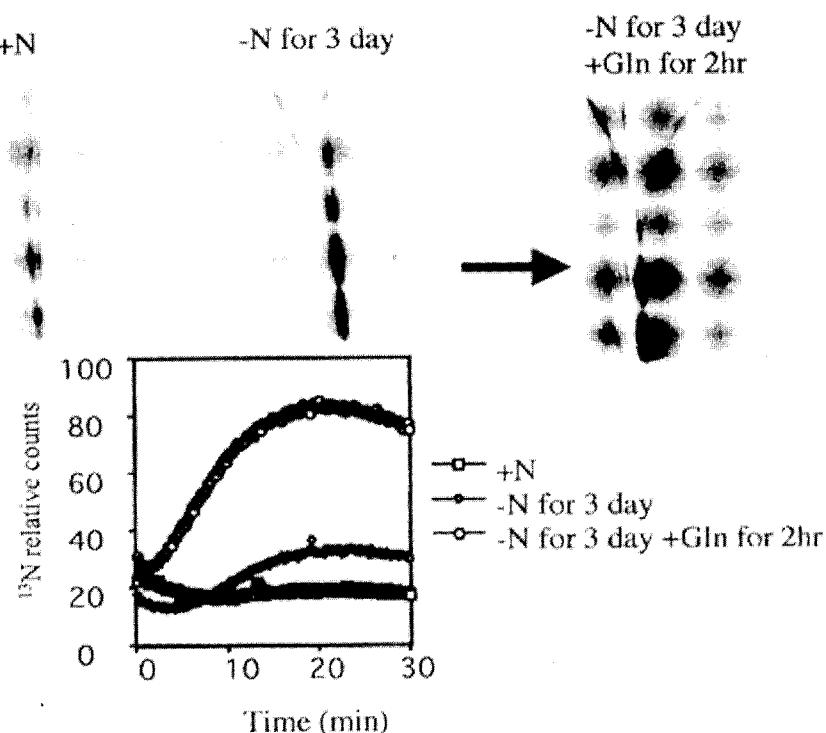


Fig.7 グルタミン処理による<sup>13</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>吸収への影響

2-4. 2-3と同様の条件で後半3週間について高CO<sub>2</sub>濃度(1000 ppm)下で生育させたイネにおいて同様の実験を行ったところ、飢餓後2時間の窒素源処理を施した③において窒素飢餓処理のみの②よりも大幅な<sup>13</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>取込が観察された(Fig. 6)。このことから高CO<sub>2</sub>下で生育させたイネは窒素飢餓の後2時間の窒素源の吸収でも同化後形成されたグルタミンにGOGATが働いてアンモニア同化の基質であるグルタミン酸が供給されて<sup>13</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の取込活性が大幅に上昇することが示唆された(Fig. 3 参照)。

2-5. 2-4. と同様に水耕栽培したイネを通常の大気中で③の処理を行うとき培地の窒素源をグルタミンに変えて同様の実験を行った。グルタミンはアンモニア同化の最初の代謝産物であり、この処理によって高濃度 CO<sub>2</sub> 処理を行ったイネと同様のアンモニア取込に関する促進効果が認められた(Fig. 7)。体内グルタミンの集積が GOGAT の作用によってアンモニア同化の相手であるグルタミン酸の濃度を高めるために、<sup>13</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の吸収が促進されることが示唆された。

2-6. <sup>13</sup>N 標識グルタミンを酵素標識法で合成して、イネの根から吸収させたところ、根から検出され、上記 2-5 の実験ではグルタミンが根から直接吸収されて作用したものであることが確認された(データーは示さない)。(なお、オオムギを用いた実験で Mori 等はすでに <sup>14</sup>C 標識グルタミンの根での吸収代謝実験を行っている(Mori et al. 1980) )。

### 3. ダイズ根粒による<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>と<sup>13</sup>N<sub>2</sub>の同化 (新潟大学農学部 大山卓爾研究班)

大山らはダイズの生産性を上げるために、炭素(C)とチッソ(N)の代謝を研究している(Ohtake et al. 2001, Kawachi et al. 2002)。葉から同化された<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>が約25分後に根粒に優先的に転流集積はじめることが示された。<sup>11</sup>Cは最新葉以外の葉にはほとんど移行しなかった。つまり根粒がN<sub>2</sub>固定能を十分に発揮するためには多大なCの供給が必要であることがわかつた。つまり根粒の機能を発揮するためには「光合成活性も高い必要がある」。農水省で開発された根粒着生能の異常に高い(super nodule)変異株が必ずしもダイズの高収量に結びつかない理由がこれによって説明できる。一方、<sup>13</sup>N<sub>2</sub>ガスを作成して根粒への直接的な吸収、移行を測定したが、<sup>13</sup>Nがわずかに根粒に集積することが観察できたにすぎない(Fig. 8)。その理由は、通常大気では約80%のN<sub>2</sub>ガスで占められているが、この実験系では高い濃度の<sup>13</sup>N<sub>2</sub>を含む系を未だ供給できていないためである。この問題を解決すれば、根粒によって固定された<sup>13</sup>Nが最初にどこに転流するのかという未解明の興味ある知見が得られるであろう。しかしながら、この根粒による<sup>13</sup>N<sub>2</sub>同化の可視化は世界初のものである。



Fig.8  $^{13}\text{N}_2$ のダイズ根粒への集積。ダイズ品種Williamsに対して $^{13}\text{N}_2$ を20分供給し、その後BASにより放射能の分布を測定した。ダイズ植物体（左）、BASイメージ（右）

#### 4. 光合成産物の転流に及ぼすCdの影響 （東京大学大学院農学生命科学研究科 林浩昭研究班）

林らは一貫して転流の研究を行っている(Hayashi et al, 1997). 平成15年度からTIARAで製造が可能になる、イタイイタイ病の原因物質であるCdのイネ体内における移行を研究する予備実験として、イネの根を $100 \mu\text{M}$ のCdで1日処理し光合成産物の転流に及ぼすCd影響を調べた。その結果イネの葉から同化した $^{14}\text{CO}_2$ 同化産物のDCへの移行は対照区が15分であるのに対しCd処理区は20分を要した。あきらかにCdによる転流阻害が観察された。

#### 5. ダイズにおけるバナジウムの吸収動態について（東京大学大学院農学生命科学研究科 中西友子研究班）

バナジウムの植物への吸収動態を調べた。茎で切断したダイズで $^{48}\text{V}$ を吸収させるとキャリアーフリーの場合にはキャリアーがある場合よりも上部に移動しにくいことが示された。これは切断口がキャリアーによってマスクされるためと考えられた。次にリン欠乏のダイズに $\text{PO}_4^{3-}$ のアナログである $\text{VO}_4^{3-}$ を与えその取り込み動態を $^{48}\text{V}$ を用いて調べた。ダイズは播種後3週間目の

ものを用い、リン欠処理は5日間施した。PETISで8時間<sup>48</sup>Vの吸収動態を測定した。リン欠乏処理区のダイズの<sup>48</sup>V吸収量が高いことが確かめられた。暗条件下ではリン欠処理区とコントロール区のダイズの<sup>48</sup>V吸収量に差はみられなかった。

## 6. 高炭酸ガス・ストレス下での光合成産物の転流（高崎原研 関根俊明・久米民数研究班）

6-1. ソラマメの葉に個葉単位で高濃度CO<sub>2</sub>を曝露すると、曝露葉から転流する光合成産物量は大気中CO<sub>2</sub>濃度環境下の葉からの転流量に比べ著しく増加するが、葉の一部の領域のみに高濃度<sup>11</sup>CO<sub>2</sub>を曝露しても、その部位での炭酸同化量および転流する光合成産物量に変化はなかったことから、高濃度CO<sub>2</sub>には個葉単位で応答していることが示唆された。

6-2. 新規ポジトロン放出核種として<sup>105</sup>Cd（半減期 55.5 m, 26.1%）の製造技術、及び有機物標識出発物質として<sup>18</sup>F<sub>2</sub>ガス、<sup>76</sup>Brの製造方法の検討を開始した。また、気体標識化合物<sup>13</sup>N<sub>2</sub>ガスの安定供給を可能とした。

## 参考文献

1. Nakanishi H, Kiyomiya S, Tsukamoto T, Tsukada H, i Uchida H, and Mori H Water (H,<sup>18</sup>O) flow in rice is regulated by the concentration of nutrients as monitored by Positron Multi-Probe System (PMPS). *Soil Science and Plant Nutrition* 48, 759-762 (2002).
2. Buglio N, Nakanishi H, Kiyomiya S, Matsuhashi S, Ishioka N S, Watanabe S, Uchida H, Tsuji A, Osa A, Kume T, Hashimoto S, Sekine T, Mori S. Real-time [<sup>11</sup>C]methionine translocation in barley in relation to mugineic acid phytosiderophore biosynthesis. *Planta* 213, 708-715 (2001)
3. Kiyomiya S., Nakanishi H., Uchida H., Tsuji A., Nishiyama S., Futatsubashi M., Tsukada H., Ishioka NS, Watanabe S, Osa A, Matsuhashi S, Hashimoto S, Sekine T, Mori S. Real time visualization of <sup>13</sup>N translocation in rice under different environmental conditions using positron emitting tracer imaging system. *Plant Physiology* 125, 1743-1753 (2001).
4. Kiyomiya S, Nakanishi H, Tsuji A, Uchida H, Nishiyama S, Tsukada H, Ishioka N S, Watabnab S., Osa A, Mizuniwa C, Matsuhashi S, Hashimoto S, Sekine T, Mori S. Light activates H<sub>2</sub><sup>18</sup>O flow in rice - Deatailed monitoring using a positron-emitting tracer imaging system (PETIS) *Physiologia Plantarum* 113, 359-367 (2001).
5. Mori S, Kiyomiya S, Nakanishi H, Ishioka NS, Watanabe S, Osa A, Matsuhashi S, Hashimoto S, Sekine T, Uchida H, Nishiyama S, Tsukada H, Tsuji A. Visualization of <sup>15</sup>O-water flow in tomato and rice in the light and dark using a positron-emitting tracer imaging system (PETIS). *Soil Science and Plant Nutrition* 46, 975-979 (2000).
6. Nakanishi H, Buglio N, Matsuhashi S, Ishioka NS, Uchida H, Tsuji A, Osa A, Sekine T, Kume T, Mori S. Visualising real time [<sup>11</sup>C]methionine translocation in Fe-sufficient and Fe-deficient barley using a positron emitting tracer imaging system (PETIS). *Journal of Experimental Botany* 50, 637-643. (1999)

7. Sonoda Y, Ikeda A, Yamaguchi J Characterization of rice ammonium transporters, OsAMT1;1 and OsAMT1;2. *Rice Genetics Newsletter* 17, 89-92 (2000)
8. Mori S, Nishizawa NK Nitrogen absorption by plant root from the culture medium where organic and inorganic nitrogen coexist.. II. Which nitrogen is preferentially absorbed among [ $^{14}\text{C}$ ]GluNH<sub>2</sub>, [2,3- $^3\text{H}$ ]Arg and Na $^{15}\text{NO}_3$ ? *Soil Science and Plant Nutrition* 25, 51-58(1980)
9. 池田 亮, 園田 裕, 山口淳二 根の側根形成と窒素の取り込みに関する遺伝子群-植物の根に関する諸問題(79). 農業および園芸 75: 301-308 (2000)
10. Kume T, Matsuhashi S, Shimazu M, Ito H, Fujimura T, Adachi K, Uchida H, Shigeta N, Masuoka H, Osa A, Sekine T. Uptake nad transport of positron-emitting tracer( $^{18}\text{F}$ ) in plants. *Applied Radiation and Isotopes* 48, 1035-1043(1997)
11. 熊澤喜久雄 植物栄養学大要 養賢堂
12. Ohtake N, Sato T, Fujikae H, Sueyoshi K, Ohyama T, Ishioka NS, Watanabe S, Osa A, Sekine T, Matsuhashi S, Ito T, Mizuniwa C, Kume T, Hashimoto S, Matsuhashi S, Ito T, Mizuniwa C, Kume T, Hashimoto S, Uchida H, Tsuji A Rapid N transport to pods and seeds in N-deficient soybean plants. *Journal of Experimental Botany* 52, 277-283(2001)
13. Hayashi H, Okada Y, Mano Y, Kume T, Matsuhashi S, Ishioka NS, Uchida H, Chino M Detection and characterization of nitrogen circulation through the sieve tubes and xylem vessels of rice plants. *Plant and Soil* 196, 233-237(1997)
14. Clarkson DT, Calvajal M, Henzler T, Waterhouse RN, Smyth AJ, Cooke DT, Steudle E Root hydraulic conductance: Diurnal aquaporins expression and the effect of nutrient stress. *Journal of Experimental Botany* 51, 61-70(2000)
15. Zwieniecki MA, Melcher PJ, Holbrook NM Hydrogel control of xylem hydraulic resistance in plants. *Science*, 291, 1059-1062(2001)
16. Kawachi T, Nishijo C, Fujikake H, Latif SA, Ohtake N, Sueyoshi K, Ohyama T, Ishioka NS, Watanabe S, Osa A, Sekine T, Matsuhashi S, Ito T, Mizuniwa C, Kume T, Hashimoto S, Uchida H, Tsuji A Effect of anion channel blockers on xylem nitrate transport in barley seedlings. *Soil Sci Plant Nutr* 48, 271-277(2002)
17. Keutgen N, Matsuhashi S, Mizuniwa C, Ito T, Fujimura T, Ishioka NS, Watanabe S, Sekine T, Uchida H, Hashimoto S Transfer function analysis of positron-emitting tracer imaging system (PETIS) data. *Applied Radiation and Isotopes* 57, 225-233 (2002)

### 主な質疑応答

ポジトロン放出核種を用いて実験しているが、植物を対象とするためコンスタントな栽培条件が要求される。またマシンタイムの不足から、再現性を得るのがたいへんである。休んでいるかのように見える脈動の理由についての質問があった。それは生物学的な理由であり、物理や化学の現象ではない。物質によって移動が違うことが明らかになっている。植物はいろんな

条件下で特異な挙動をとるが、15種類のトランスポーター（たんぱく質）が関与している。水酸第2鉄あるいはキレート鉄などの可溶性の鉄あるいは亜鉛を植物に導入して、どういうトランスポーターが働くかをリアルタイムで解明できることを期待したい。新しい現象として亜鉛の脈動メカニズムはぜひ解説してほしい。以下に主な質疑応答を記す。

Q：元素移動で脈動が現れるのは、環境が悪いため吸い上げに疲れて休むと考えて良いのだろうか。赤ん坊が乳を飲む時に、急いで飲んで、また疲れて顔を伏してしまうというような気がする。何かストレスの加え方を変えると感覚が変わるということか。

A：まだ全く観測ができない現象なので、物理化学的現象ではないかという議論もあるが、たぶんバイオロジカルな現象だと思う。休んでいると言つていいかも知れない。

C：もう少しマシンタイムがあれば、もっと丁寧にデータが取れると思う。

Q：非常に面白いデータであるが、物質によって移動する速度が違うというのは、メカニック的には何が原因か。

A：いろんな元素やアミノ酸等有機酸全てに関して、植物の細胞膜にトランスポーターがある。要するにそれを運ぶ蛋白質であるが、これがダイナミックに変動している。環境によって変動する元素特異的なものが多くある。例えばカリウムだと15種類ぐらいある。説明しましたNaSという遺伝子のニコチアラミンのトランスポーターはだいたい15種類ある。沢山あるということは色々な組織で、組織特異的に色々な条件下で特異的に発現する。それは環境要因を拾いながら制御しながらものを動かしているということである。それは一律ではなく、原則である。

Q：移動についての予測と実験は将来的には合わせることができるのか。

A：説明したOSATMはアンモニアのトランスポーターであるが、これを根で実際に過剰発現させると予想通りにアンモニアを多く吸収することを示せたということである。

Q：窒素の場合はアンモニアで与えられたということであるが、鉄とか亜鉛はどうゆう形で与えられたのか。

A：鉄は水の中に溶けている時は実はほとんど溶けていなくて、水酸化第二鉄になって沈殿する。このためムギネ酸という化合物で与えたり、キレート鉄で与える。あるいはニコチアラミン鉄という形で与えないといけない。その他の亜鉛などは無機イオンで与えている。

Q：化学形をいろいろ変えて実験を行うことはできると言うことか。

A：そのとおり。化合物の形、イオンであるものは、水に溶けていればほとんど最初の吸収のところは、イオンのトランスポーターが最初の入り口として取り込む。中に入ったら、鉄の場合は3価の鉄を2価に還元しなければならず、その還元酵素が今ここに入れた遺伝子のことであるが、その還元酵素の力の違いによって吸収力が変わることがある。与えたものの化合物の形態は一番最初に根から吸収される時にどうゆうトランスポーターが働くかによって異なる。でも通常はイオンで入れた場合はそのイオン特有のトランスポーターがある。尤も、鉄の場合だけはまず還元しなければいけない。あるいはアルカリ土壌では銅とかマンガンとか亜鉛などは酸化で沈殿しているので、還元して溶ける状態にしなければいけない。色々な適応のメカニズムとして、植物の根からいろいろなものを

出すメカニズムがある。環境ストレスに対して、特に土壌の場合はどの様な環境要因を与えた時に根がどの様に反応して、ものを取り込むかということを我々のグループは行っている。

Q : PETISに関して非常に期待をしていたのは、今までの方法ではおそらく不可能であったりアルタイムでものが見られることを利用して、何か新しい現象が見つからないだろうかということであった。本日報告されたような亜鉛の脈動は本当の発見ではないかと思っているので、是非このメカニズムを解析して欲しい。アンモニアを入れた時もやはり図を見ると、少し脈動が見えるように思うが、これはデータのブレか。

A : 非常に放射能が強いものを入れないと、脈動は正確には見れない。アンモニアの場合でも、ギガベクレルのオーダーの非常に強いものを入れて、誤差を無視できる形での測定法が開発されれば、実際のアンモニアでも脈動が見えるかも知れない、硝酸でも見えるかも知れない。

Q : 高崎研で標識化合物の製造技術が進められているので、あと二桁ぐらい強くなればいいということか。

A : そのとおり。

C : 二桁ぐらい強くなるとまた違う世界が見えてくるということなので、被ばくをしない範囲では非一桁以上改善してほしい。これに関しては高崎研の開発担当者と森先生との双方の相乗効果のもとで頑張ってほしい。

## 2.2.5 大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用

東北大学 石井 慶造

### (1) 概要

陽子を2MeV～3MeVまで加速して、試料に照射すると、試料中に含まれる微量元素の特性X線が感度良く検出される。これに基づいた元素分析法は、PIXE分析法と呼ばれ、ナトリウムからウランまでの微量元素を同時にppb～ppmの感度で、しかも非破壊で検出できるため、広い分野に応用されることができる。PIXE分析法の特徴は、磁場および電場を用いてビームを試料表面上で走査でき、他の分析法と異なり、試料内の元素分布画像が得られることである。本研究の目的は、さらにビーム径を1ミクロン以内に絞込み、それを大気に取り出して、走査し、大気中の試料の元素濃度の空間分布をミクロンの精度で得る技術を確立し、これを医学・環境に応用することである。現在、1ミクロン以下のビーム径のマイクロビームを利用できる施設は、国内では日本原子力研究所高崎研究所TIARAしかない。同研究所は、長年の間、マイクロビーム技術の開発に精進し、世界でもトップレベルの技術を有している。一方、東北大学も長年の間、PIXE分析技術の開発を行い、本技術に精通している。本協同研究は、両グループの技術を持ち寄ってお互いに協調し合って達成できたもので、下記に示すように多くの成果とともに本技術についての新たな展開を生むなど、大学・原研プロジェクト協同研究に相応しい結果が得られた。これらの成果を、平成14年8月日にプレス発表し、国内に広く公表した。さらに、高崎に招致した平成14年9月9日～13日のICNMTA会議では、本研究についての国際ワークショップを開催し、本協同研究で開発された大気マイクロPIXE技術が世界水準を越えていることを示した。

本研究は、4つの研究課題で構成された。以下に、それぞれの課題についての研究成果を概略する。

### 1. 大気マイクロPIXE分析システムの開発

通常のマイクロPIXE分析では、試料は真空中でビーム照射されるため、生体試料のような場合は、試料が加熱され、収縮および元素の蒸発が生じ、本来の元素分布画像が得られない。そこで、薄いマイラー膜に試料を載せ、これを真空窓且つターゲットとして用い、試料を大気側にして分析する技術を開発した。しかし、細胞一つ一つを薄い膜に載せることは難しいし、うまく固定できない。そこで、我々は薄いマイラー膜上で細胞を培養し、これをターゲットとする技術を開発した。この技術開発においては、牛の血管内皮細胞が用いられた。この内皮細胞の調製技術の開発は、東北大学工学研究科機械電子工学専攻の佐藤正明教授との協同研究を行った。これにより、培養細胞に対するマイクロPIXE分析のための試料調整法は確立された。培養細胞の分析の要求に加えて、生体から取り出した組織切片の分析も必要とされる。ラットの肝臓がんの組織を用いて、試料の変形もなく、元素分布画像が得られる組織切片のターゲット調製方法を開発した。

### 2. 大気マイクロPIXE分析システムの細胞内代謝機能解析への応用

「大気マイクロPIXEの細胞内代謝機能解析への応用」の研究は、「大気マイクロPIXE分析システムの開発」と並行して行われた。牛の血管の内皮細胞の核に取り込まれるプロモオキシウリジンの集積量を、培養時間を変えて測定したところ、24時間培養の細胞は集積量の多いもの

と少ないものとの2つのグループに分けられることが分かった。これにより、マイクロPIXEカメラの細胞の新陳代謝研究への適用の見通しが得られた。さらに、放射線照射によるヒト白血病細胞の壊死、アポトーシス、再増殖の研究への応用が試みられた。照射後のアポトーシス初期の細胞においては、細胞質にFe元素が点状に集積することが認められた。これらの結果は、アポトーシスの機構を解明する非常に有用な情報であると考えられる。さらに、組織切片の大気マイクロPIXE分析の臨床応用への可能性が調べられた。肝腫瘍AH109Aをドンリュウラットの背部皮下に移植し、組織切片を取り出し、大気マイクロPIXE分析を行った。P、Cl、Fe、Ca、S、Kの分布画像が得られた。

### 3. マイクロPIXE分析技術のエアロゾル分析への応用

コロジオン膜法を用いて霧粒や微小雨滴を個別にサンプリングする手法を確立し、微小雨滴の個別元素分布分析を可能とした。各種環境・気象条件下でエアロゾル粒子（固体）や霧粒・雨滴（液体）試料の個々の粒子内の元素マップを作成するとともに、粒子内の混合状態を明らかにした。同一試料に対し、100個以上の粒子の性状データを収集・統計解析し、粒子の性状特性を明らかにした。

### 4. 高感度大立体角マイクロPIXE検出システムの開発

現在、大気マイクロPIXEにおいて、細胞試料の微量元素分布画像を得るのに数時間要する。この問題を解決するには、試料の損傷を考えると、ビーム電流を上げることはできないので、検出器の立体角を上げる必要がある。従来の10倍の立体角を有する検出システムを開発した。この検出システムは、数keVのX線と数MeVの散乱粒子を同一の検出器で検出できるものであり、PIXE画像に加えて試料の立体的形状を反映するRBS画像も同時に得られることができる。

以上示したように、大気マイクロPIXE分析の基礎的技術は本研究で開発された。今後は、この技術に基づいた応用研究とそれによって誘導される新たな技術の開発研究が展開され、これら研究を通して、本技術による「発見」を期待したい。

### 研究組織

大学：石井慶造\*（責任者）、山崎浩道、松山成男、杉本明日香、田中晃、小森祐嗣、

大石幸裕（東北大工）、横田聰（東北大農）、原田聰（岩手医科大）、

福田寛、窪田和雄（東北大 加齢医研）、笠原三紀夫、馬昌珍、井ノ口優芽

（京都大学）

原研：荒川和夫\*（責任者）、神谷富裕、酒井卓郎、及川将一、佐藤隆博

（放射線高度利用センター ビーム技術開発室）

## (2) 大気マイクロPIXE分析システムの開発

東北大大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 石井慶造、山崎浩道、松山成男、杉本明日香、田中晃、小森祐嗣、大石幸裕

東北大大学院工学研究科機械電子工学専攻 佐藤正明

東北大大学院農学研究科 横田聰

岩手医科大学医学部 原田 聰

東北大大学加齢医学研究所 福田寛、窪田和雄

原研高崎TIARA 荒川和夫、神谷富裕、酒井卓郎、及川将一、佐藤隆博、西堂雅博

### 1. はじめに

加速器を用いたPIXE分析法<sup>1)</sup>は、数ppmから数ppbまでの微量の元素をナトリウムからウランまで同時に分析できるすぐれた方法である。PIXE法では、通常は、数mm径のビームスポットで分析するが、数μm径にビームを絞り<sup>2)</sup>、試料表面上を走査し、X線とそれが発生した位置を記録することによって<sup>3)</sup>、元素分布画像を得ることができる。これは、他の分析方法と大きく異なる特長である。PIXE分析法はX線検出器窓の吸収のため、炭素、窒素、酸素などのような軽元素に対しては、感度が低いので、これら軽元素を主成分元素とする生体試料の分析には、むしろ都合が良い。通常、PIXE法では、試料は真空チャンバー内に置かれて照射され、分析される。したがって、生体試料のような場合には、完全に乾燥させた状態になるので、得られた元素分布は、生きた状態のものと程遠いものとなる。そこで、我々は、大気中で生体試料をマイクロPIXE分析できるシステムの開発を行った。大気中なので、生体試料はウェットな状態で分析でき、又冷却が可能のため、揮発性元素の散逸、試料の収縮を防げる。

### 2. 大気マイクロPIXEカメラと培養細胞の分析

図1に示すように、4 μm厚のマイラー膜上に細胞を培養し、細胞の着いている側を大気中にし、反対側を真空側にしてチャンバーの真空窓として用い、マイクロビームを照射した。これによって、マイクロビームの空間分解能を落とすこと無く分布画像が得られた。図2は、世界で初めて得られた大気中のマイクロPIXEカメラ画像である。細胞は、牛の血管の内皮細胞で、カリウム、イオウ、燐、臭素の各元素の細胞内での空間分布を示されている。イオウは、細胞全体に広がっており、カリウム、燐は核に集中していることがわかる。図の右は試料を光学顕微鏡で撮影したもので、イオウの分布と細胞の形状は、マイクロPIXE分析によても変わらないことがわかる。DNA合成に使われるプロモーター

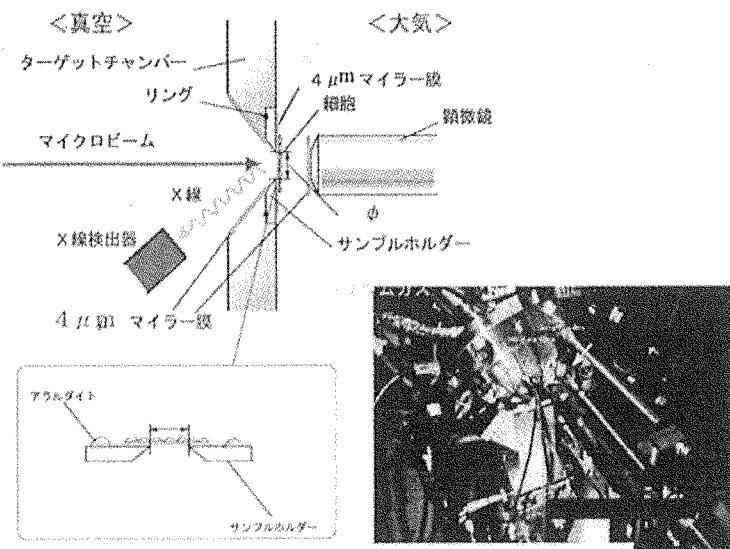


図1. 大気マイクロPIXEカメラ  
— 59 —

キシウリジンを、細胞がいかにこの薬剤を取り込むかを調べるために、培養液の中に混入させた。臭素はプロモデキシウリジン中のものであり、核内に局所的に取り入れられた様子がマイクロPIXEカメラによって良く観察されている。マイクロPIXEの特長の一つは、ミクロン領域の元素を定量解析できることである。図の右にリンと臭素の細胞内での集積量を示した。これは、抗がん剤のガン細胞の取り込み具合を調べるなどの医療への応用として今後おおいに期待される。

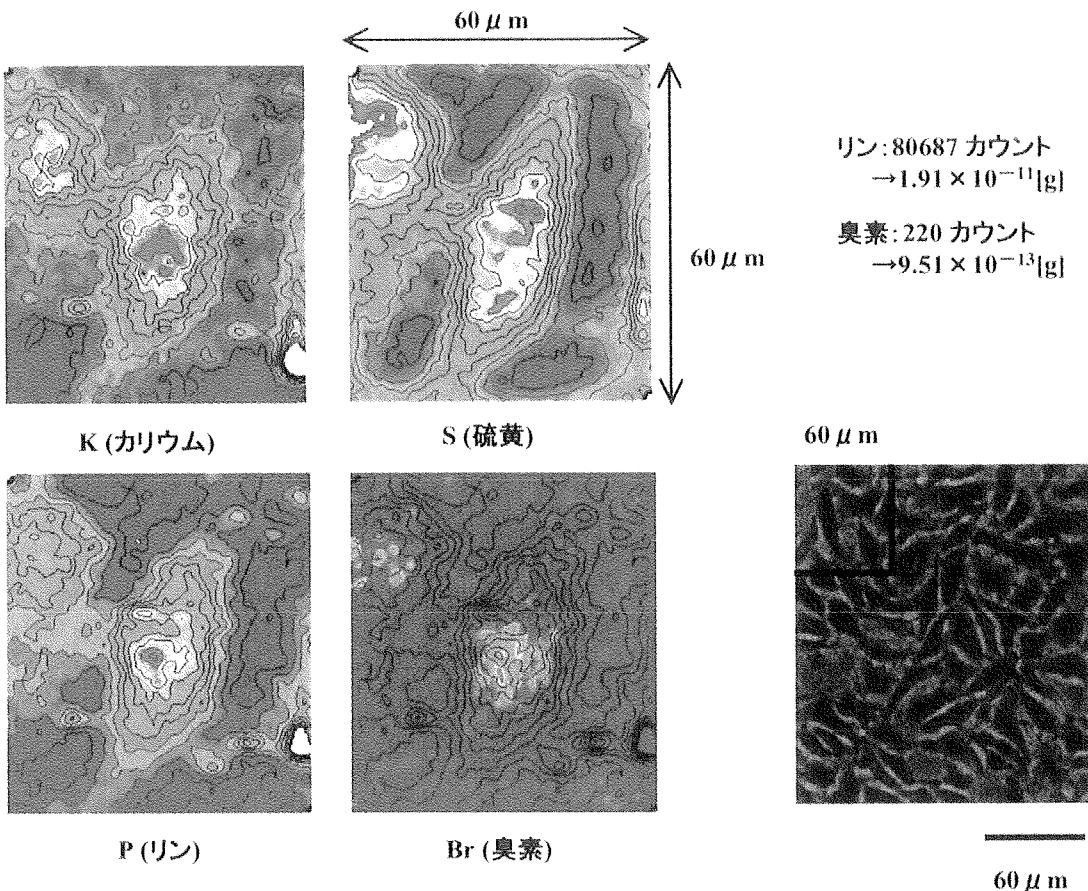


図2. マイクロPIXEカメラで捉えた牛の血管の内皮細胞内の元素分布  
2.6MeV陽子衝撃、スキャン領域 $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ 。

#### 4. 組織切片の分析法の開発

生物・医学においては、培養細胞だけでなく、生体から取り出した組織の細胞内の元素分析も重要である。生体の組織を取り出して分析する方法について、化学固定法、凍結乾燥法、自然乾燥法の3つの方法を検討し、このうち凍結乾燥が最も適しており、細胞の形状と元素の量を保存することがわかった。

ドンリュウラットに肝腫瘍AH109Aを背部皮下に移植し、1週間後にプロモデオキシウリジンの溶液0.5mlを6時間おきに3回投与し、その後、過麻酔により屠殺し、腫瘍・肝臓組織を取り出した。組織は採取後直ちに液体窒素にて急速凍結し、ミクロトーンを用いて10ミクロンの厚さの切片を作成した。

凍結切片を $4\mu\text{m}$ マイラー上に貼り付け、これをペルチエ素子により $-10^\circ\text{C}$ にした銅のステージの上に載せ、2日間真空中で凍結乾燥させ、その後連続的に銅ステージを室温にまで上

げ、12時間後に大気に戻した。これを大気マイクロPIXEカメラで分析した結果、リン、イオウ、塩素、カルシウム、カリウム、亜鉛、臭素が検出された。特にリンは局所的に分布していた。臭素はリンが集中している箇所に分布していた。ビーム照射後の試料を位相差顕微鏡で観察し、元素の分布と細胞の形状との整合性を確かめた。

### 5. マイクロPIXEカメラのインターネットによる共同利用

マイクロPIXEカメラは、元素分布画像を提供するものであり、利用者は画像を観察して判断するので、必ずしも実験現場にいる必要はない。そこで、インターネットによる画像データの転送による共同実験が可能になる。東北大学と原研・高崎研T I A R Aとの間でインターネットによる共同実験が試みられた。これにより、患者を抱えて多忙な医者が、マイクロPIXEカメラセンターに試料を送り、遠隔地の病院で画像を観察し診断することができるようになった。

### 参考文献

- 1) S. A. E Johansson and J. L. Cambell, PIXE . A Novel Technique for Elemental Analysis, John Wiley & Sons (1988).
- 2) T. Kamiya, T. Suda, and R. Tanaka, Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B104, 43(1995).
- 3) S. Matsuyama, K. Ishii, A. Sugimoto, T. Satoh, K. Gotoh, H. Yamazaki, S. Iwasaki, K. Murozono, J. Inoue, T. Hamano, S. Yokota, T. Sakai, T. Kamiya, and R. Tanaka, International Journal of PIXE, 8, 203(1998).

### 研究成果

- 1) PIXE spectrum analysis taking into account bremsstrahlung spectra, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 150, 76 - 82 (1999), K. Murozono, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Matsuyama, and S. Iwasaki.
- 2) An Endurance Test of Kapton Foil in In-Air PIXE System, AIP, Conference proceedings, CP475, 480-483(1999), S. Matuyama, J. Inoue, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Iwasaki, K. Goto, K. Murozono, T. Sato, and H. Orihara.
- 3) An Open Experiment of a Submilli-PIXE Camera, International Journal of PIXE, 9, No. 1&2, 43-46 (1999), S. Matsuyama, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Iwasaki, Y. Tokai, A. Sugimoto, H. Endo, T. Ozawa, H. Orihara.
- 4) Radiation Damage of Paper Samples in In-Air PIXE Analysis, International Journal of PIXE, 9, No. 1&2, 47-50 ( 1999), S. Matsuyama, H. Endo, K. Ishii, H. Yamazaki, Y. Tokai, A. Sugimoto, K. Yamamoto, T. Satoh, H. Orihara.
- 5) No Deterioration Elemental Analysis with In-Air Submilli-PIXE Camera, International Journal of PIXE, 9, No. 1 &2, 57-61 ( 1999), S. Matsuyama, K. Ishii, H. Yamazaki, H. Endoh, T. Satoh, K. Yamamoto, A. Sugimoto, Y. Tokai, H. Orihara, S. Yokota, A. Fujisawa, T. Sekine, Y. Nara, N. Chiba and T. Sutoh.

- 6) Application of Micro-PIXE Camera to Elemental Analysis of a Single Cell,  
International Journal of PIXE, 9, NO.3&4, 150- 160 ( 1999),  
A. Sugimoto, K. Ishii, S.Matsuyama, T.Satoh, K. Gotoh, H.Yamazaki, C. Akama, M. Sato,  
T. Sakai, T.Kamiya, M.Oikawa, M.Saido, and R.Tanaka.
- 7) An external ion Microbeam for Studies of Biological Samples,  
Biological trace element research 71 -72, 77-82 (1999),  
T. Sakai, Y. Naitoh, T. Kamiya, S. Matsuyama, K. Gotoh, S. Yokota, H. Yamazaki,  
K. Ishii.
- 8) Development of In-Air Micro-PIXE Analysis and Data Sharing Systems in JAERI  
TAKASAKI,  
International Journal of PIXE, Vol.10, 91-95(2000),  
T. Sakai, T. Kamiya, M. Oikawa, T. Sato, A. Tanaka and K. Ishii
- 9) マイクロPIXEカメラの医療応用への期待、放射線と産業、86, p4-9, (2000)、石井慶造.
- 10) Bio-PIXE 今日までの歩み、RADIOISOTOPES, 49, 411-416(2000)、石井慶造.
- 11) Elemental analysis of cellular samples by in-air micro-PIXE,  
Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 181, 448-453 (2001),  
K. Ishii, A. Sugimoto, A.Tanaka, T.Satoh, S.Matsuyama, H.Yamazaki, C.Akama,  
T.Amartivan, H.Endoh, Y. Oishi, H.Yuki, S.Suegara, M.Satoh, T.Kamiya, T.Sakai,  
K.Arakawa, M. Saidoh, S.Oikawa.
- 12) Investigation on the Influence of Back-Scattered Protons in PIXE Spectrum,  
International Journal of PIXE, Vol.11, 49-59(2001),  
T.Satoh, K.Ishii, S.Matsuyama, H. Yamazaki, Ts. Amartivan, A. Tanaka, S. Sugihara,  
Y. Komori, K. Kato, T. Kamiya, T. Sakai and K. Arakawa.
- 13) The kinetics of Fe and Ca for the development of radiation-induced apoptosis by  
micro-PIXE imaging, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 189, 437-  
442 (2002),  
S.Harada, Y.Tamakawa, K.Ishii, A.Tanaka, T.Satoh, S.Matsuyama, H.Yamazaki, T.Kamiya,  
T.Sakai, K.Arakawa, M.Saitoh, S.Oikawa, K.Sera.

## (3) 大気マイクロPIXE分析システムの細胞内代謝の機能解析への応用

東北大学大学加齢医学研究所 窪田和雄、福田寛

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 石井慶造、山崎浩道、松山成男、杉本明

日香、田中晃、小森祐嗣、大石幸裕

東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻 佐藤正明

岩手医科大学医学部 原田 聰

原研高崎TIARA 荒川和夫、神谷富裕、酒井卓郎、及川将一、佐藤隆博、西堂雅博

## 1. はじめに

細胞内での代謝をその元素分布の変化を画像としてみるとことは、生物学および医学において非常に魅力的な技術である。例えば、がん細胞のような場合、抗がん剤が細胞の核まで確実に届いたかを知ることは、化学療法の効果を定量的に知ることができ、患者へのリスクを避けられる。本研究では、マイクロPIXE分析の臨床応用をめざして、細胞内の代謝の機能を画像化することを目的とした。

## 2. ドンリュウラットの肝臓腫瘍の細胞内代謝画像

組織切片の大気マイクロPIXE分析の臨床応用への可能性を調べた。AH109AおよびLY80の移植腫を体重200gのドンリュウラットの背部皮下に移植し、1週間後にプロモデオキシウリジン+フルオロデオキシウリジンを投与し、組織切片を取り出し、大気マイクロPIXE分析を行った。図1に示すように、P、Cl、Ca、S、Kの分布画像を得ることができた。

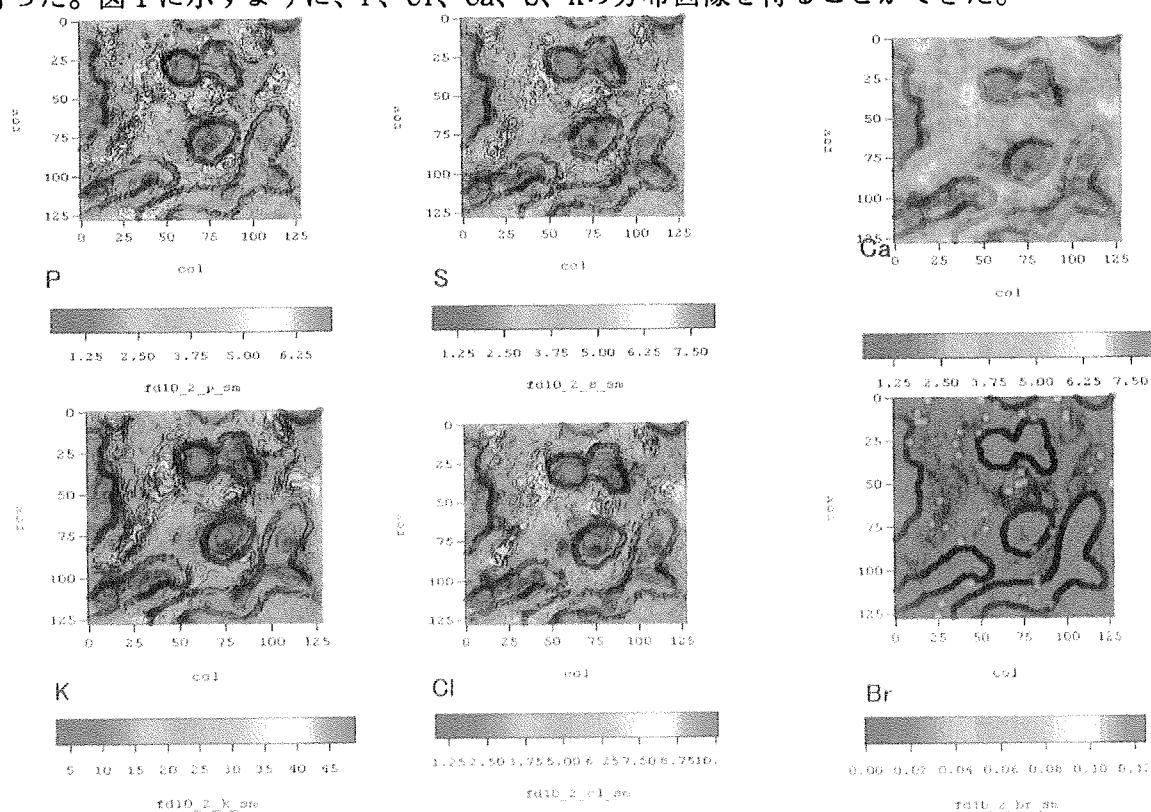


図1 ドンリュウラットの肝臓腫瘍組織切片の細胞内の元素分布画像

今回臭素元素がわずかであるが観測され、核の位置に分布しているものと判断された（図1）

参照）。臭素に関しては、培養細胞は培養液と直接に膜一枚で養分を授受するのに対して、組織切片中の細胞は、血液または体液を通して臭素は運搬され、細胞に到達するまでに様々なバリアーを経る。そのために、投与した元素の量が非常に少なく観測されるものと思われる。しかしながら、今回僅かであるが臭素が核の近傍に分布しているのが観測された。これは、検出感度を現在の10倍以上も上げた大立体角X線検出器によって、生体に投与した薬剤の組織細胞への集積が調べられることを意味し、今後、大いに期待するものである。

本研究により、大気マイクロPIXEカメラにより、生に近い状態で細胞内での元素分布を画像化することができた。そして、薬剤の取り込みと細胞の新陳代謝との関係を詳細に、しかも、定量的に調べる手段として非常に有効であることを示した。

## 2. DNA合成におけるプロモデキシリジンの取り込み

DNA合成に使われるプロモデキシリジンを、牛の血管の内皮細胞がいかにこの薬剤を取り込むかを調べた。

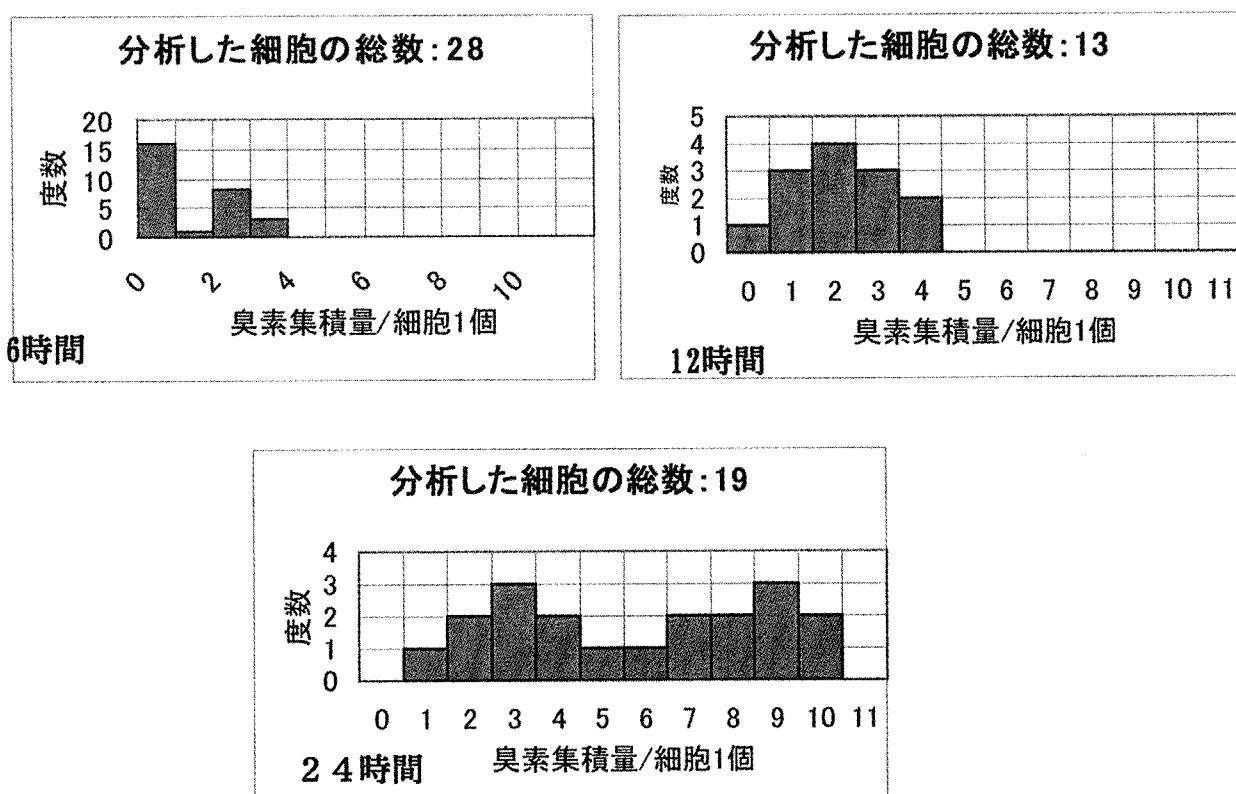


図2 牛の血管の内皮細胞内に取り込まれた臭素についてのヒストグラム

図2は、プロモデキシリジンを加えてから、6時間後、12時間後、24時間後にそれぞれ細胞を取り出して分析し、細胞の核内に集積された臭素の量とその量に対する細胞の数をグラフに表わしたものである。プロモデキシリジンを加えて6時間後、細胞の半数は、まだプロモデキシリジンを取り込んでいないが、残りの半数は取り込んでいることがわかる。12時間後は、全部の細胞がプロモデキシリジンを取り込んでしまい、そして24時間後には、

取り込み量が2ピークになることから、細胞は、一端、プロモデキシウリジンを取り込んだ後、排泄しないでさらにプロモデキシウリジンを取り込んでいると理解できる。このように、マイクロPIXEカメラは、細胞内の新陳代謝を調べるのに非常に有効な方法である。これは、抗がん剤のガン細胞の取り込み具合を調べるなどのがん治療へ応用できる。

### 3. 放射線照射ヒト白血病細胞の細胞内新陳代謝の観察

放射線照射後の細胞には、壊死、アポトーシス、再増殖の3つの分画があり、これらを識別するのは放射線生物学、放射線がん治療において重要である。原田等は、これまで放射線照射後の細胞内の微量金属元素が時間とともに一旦は上昇し、それから減少することを通常のPIXE法により示した<sup>1)</sup>。これにより壊死、アポトーシス、再増殖に細胞内微量元素が強く関与していることが示された。本研究では微量元素が細胞内のどこに集積しているのかを調べる目的で放射線照射後の細胞の元素分析を大気マイクロPIXEカメラで行なった。

細胞としてヒト白血病細胞を選び、アポトーシス感受性のMOLT-4と放射線抵抗性のHL-60にコバルト60ガンマ線を5および10Gy照射し、照射後6, 9, 12時間経った細胞について分析を行なった。照射後6時間後のMOLT-4細胞については、Fe元素の細胞質への点状集積が観測されたが、9, 12時間後のものについては、それは見られなかった。9, 12時間後のものについては、Ca元素が核中で増加し、一方、Znの減少が見られた。HL-60細胞については、このような微量元素動態は見られなかった。5Gy照射後の細胞の核中のZnの集積が認められた。これらの結果は、アポトーシスの機構を解明する非常に有用な情報である。

### 参考文献

- 1) S. Harada, P. Li, T. Yanagisawa, and K. Sera, International Journal of PIXE, 2, 461(1992).

### 発表論文

- 1) Application of Micro-PIXE Camera to Elemental Analysis of a Single Cell, International Journal of PIXE, 9, NO.3&4, 150-160 (1999), A. Sugimoto, et al.
- 2) マイクロPIXEカメラの医療応用への期待、放射線と産業、86, p4-9, (2000)、石井慶造。
- 3) Bio-PIXE 今日までの歩み、RADIOISOTOPES, 49, 411-416 (2000)、石井慶造。
- 4) Elemental analysis of cellular samples by in-air micro-PIXE, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 181, 448-453 (2001), K. Ishii, et al.
- 5) The kinetics of Fe and Ca for the development of radiation-induced apoptosis by micro-PIXE imaging, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 189, 437-442 (2002), S. Harada, et al.

## (4) マイクロPIXE分析を応用した地球環境研究

京都大学大学院エネルギー科学研究所 笠原三紀夫, 馬昌珍, 明石幸子, 井ノ口優芽

東北大学大学院工学研究科 石井慶造, 松山成男, 佐藤隆博

日本原子力研究所高崎研究所 荒川和夫, 神谷富裕, 酒井卓郎, 及川将一

## 1. 研究の目的と意義

大気エアロゾル粒子は、地球温暖化や酸性雨問題などの地球環境問題をはじめ、地域の環境汚染問題に大きく関与している。エアロゾル粒子の大気環境影響を解明するためには、エアロゾル粒子の物理・化学的性状、特に時間分解能の高い性状データが重要である。従って、大気中にごく微量にしか存在しないエアロゾル粒子の分析においては、感度が極めて高くかつ分析が容易なPIXE分析が有力であり、世界的にも大気エアロゾル粒子の分析にPIXE分析が広く応用されている。

エアロゾル粒子のPIXE分析では、通常エアロゾルをパッキング材上に集め、元素別の質量濃度を求める方法がとられている。しかしながら、このようなバルク試料に対する分析では、多数のエアロゾル粒子の集合体に関する平均的な情報が得られるのみである。一方、一粒一粒の粒子は、より多くの情報を有しており、個々の粒子に対する性状データが得られれば、より詳細な大気環境現象の解析が可能となる。

エアロゾル分析にマイクロPIXEを利用すれば、 $\mu\text{m}$  以上の粒子について個々の粒子の元素分析が可能となり、しかも粒径に関する情報も同時に得られ、大気エアロゾルの大気環境影響など、今後のエアロゾル研究に大いに役立つものと考えられる。

本研究での具体的課題としては、個々の粒子や液滴粒子内の元素の分布状況や混合状態を知ることにより、大気中におけるエアロゾル粒子の不均一反応など変質過程を解明すること、また、地球温暖化に関わるエアロゾル粒子の光学的特性や、雲粒・雨滴の酸性化に関わる性状特性などを解明することを目的とした。

本研究では、第一に大気エアロゾルの性状分析や、地球環境研究にマイクロPIXEを応用するための試料作成方法や分析条件等に対する基礎的検討、第二にエアロゾルの環境影響に関する検討、第三に定量化のための検量法の検討、を行った。

2. 大気エアロゾルのマイクロPIXE分析<sup>1)</sup>

エアロゾル粒子の化学組成分析においては、そのほとんどがバルク試料に対するもので、個々の粒子に関する情報は失われ、しかも、検出限界などの制約からその時間分解能は数時間～数日に及び、このため大気エアロゾルのように変動が激しく、高い時間分解能が求められるような場合には、個別粒子の分析が重要となる。本研究では、マイクロPIXE分析をエアロゾルの個別分析に応用し、一粒一粒の物理・化学的性状について解析した。

エアロゾル試料は、粗大粒子と微小粒子に分離して捕集できる2段フィルターパック法を用い採取した。分析は、イオンビームを $\mu\text{m}$ オーダーにまで収束させ、分析対象範囲内を走査し、各ピクセルごとに特性X線スペクトルを加算保存し、最終的に元素ごとの存在比を二次元的に表示した元素マップとして求めた。本研究では、基礎的実験の結果、マイクロビームとしては、2.5 MeV、ビーム径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 、ビーム電流 $>100\text{ pA}$ のプロトンビームを用いた。

黄砂粒子1個についての元素の分布状況を示すマッピング例を図1に示した。個別黄砂粒子の多くは、Siを主成分としCa, Feを含む土壤成分と、人為起源のSとが混合した状態で存在することが明らかになった。

### 3. 粒子の固定化とマイクロPIXE分析<sup>2)</sup>

雨や霧といった液滴は、液滴の粒径や化学成分を液体のまま、しかも一滴ごとにサンプリングしたり分析することは容易でない。液滴粒子を一粒一粒サンプリング・分析するためには、液滴をまず固体状に変換し、安定な状態とする必要がある。本研究では、①シアノアクリレートによる固定化、②凍結による固定化、③コロジオン膜による液滴からのレプリカ生成を試み、いずれの方法によっても固定化が可能で、個別に分析することが可能であることを確認した。そして、主要な元素について、図2に例示したように雨滴径の関数として雨滴中の含有量を求め、含有元素成分の粒径依存性を示すことができた。このようなデータは極めて少なく、霧や雨の生成、変質過程を調べる上で大きく寄与するものと考えられる。

### 4. マイクロPIXEの検量<sup>3)</sup>

大気エアロゾルや雨滴の含有成分として常に検出される元素であるSi, K, Cl, Ca, Feの標準試料を、真空蒸着法により作成した。表1に本研究で作成した標準試料と蒸着法を示す。なお、含有元素とピーク面積の比例関係を確認するためにKClについて3種類、その他については2種類の異なる質量厚みのものを作成した。

表1 蒸着法で作成した標準資料

蒸着物質	蒸着方法	支持材	膜厚測定法
Si	Si	電子ビーム蒸着	ポリエチレンフィルム
Cl	KCl	抵抗加熱蒸着	RBS
K			
Ca	CaF <sub>2</sub>	ポリカーボネイト フィルム	電子ミクロ天秤による 秤量より算出
Fe	Fe		

作成した標準試料については、支持材上での元素の質量厚みの均一性、また、マイクロビームの走査範囲内における均一性を確認する必要があり、フィルター中心部と周辺部における単位照射量あたりのX線収率（基準化ピークカウント）[count/nC]を比較した。その結果、支持

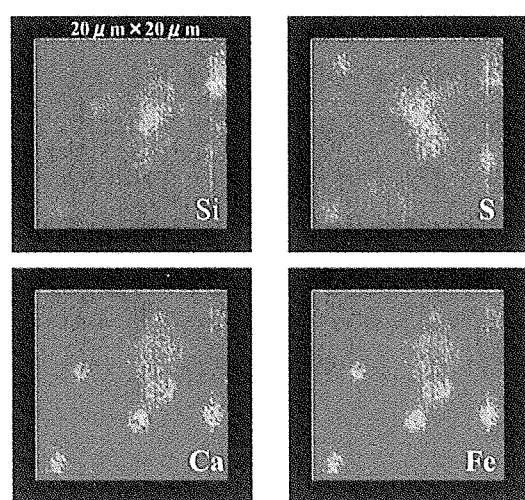


図1 黄砂粒子のマイクロPIXE分析例

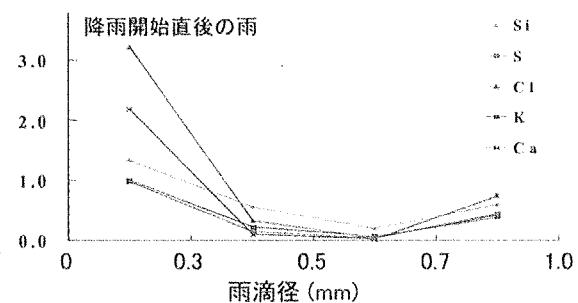


図2 雨滴径の関数として表した雨滴中の元素濃度

材の中心部と周辺部で、質量厚みはほぼ等しいことを確認した。試料中の元素を定量化するためには各元素について感度、すなわち単位質量厚み [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] に対する単位照射量あたりの X 線収率を求め、質量厚みに対するピーク面積をプロットし、最小自乗法によって定まる原点を通る検量線の傾きからその元素の感度を求めた。各標準試料から得られたスペクトルより、検量線を描いた結果を図 3 に示した。ここにみられるように、本研究で作成した質量厚みの範囲内では、質量厚みと X 線収率との間に直線関係が成立つことが確認できた。また、これらの元素について、原子番号を横軸に、感度を縦軸にプロットした感度曲線を図 3 にあわせて示した。

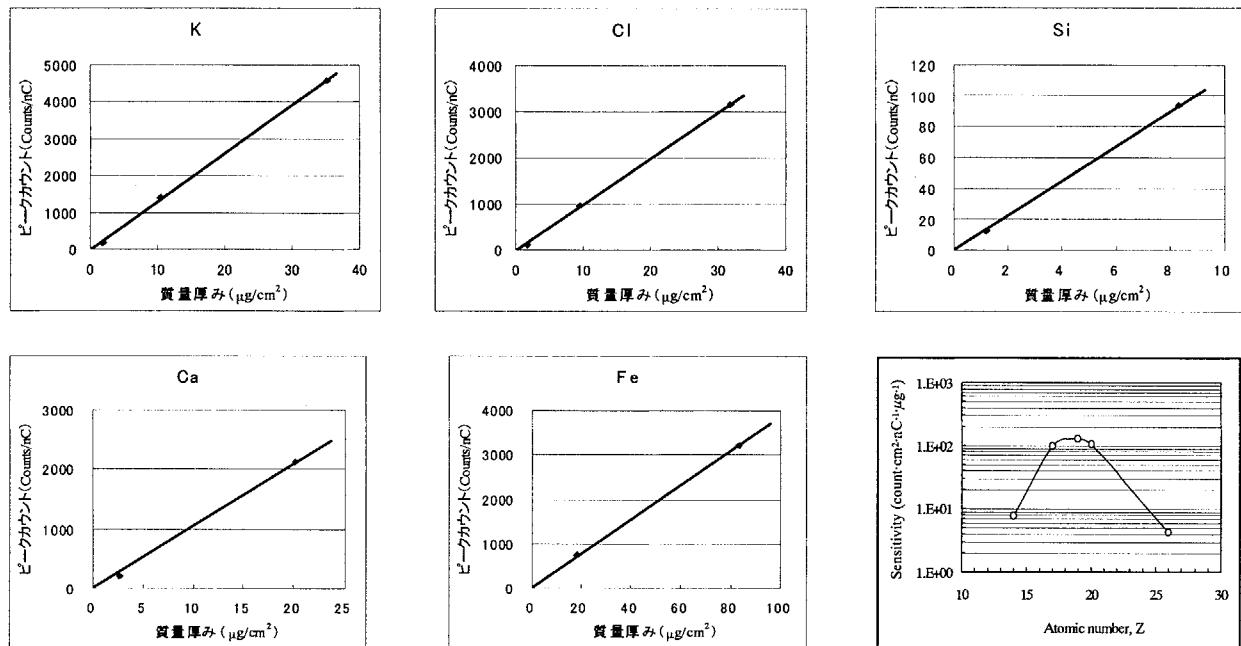


図 3 K, Cl, Si, Ca, Fe 標準試料を用いたマイクロPIXEの検量と感度曲線（右下）

## 参考文献

- 1) M. Kasahara, et al., Nucl. Instr. Meth. and Phy. Res., 181, 622-627 (2001).
- 2) C. J. Ma, et al., Water, Air and Soil Pollution 130, 1601-1606 (2001).
- 3) 井ノ口優芽、京都大学大学院エネルギー科学研究所、修士論文 (2002)

## 発表論文

- M. Kasahara, R. Höller, S. Tohno, Y. Ohnishi and C.-J. Ma: Application of PIXE technique to studies on global warming/cooling effect of atmospheric aerosols, *Nuclear Instruments & Methods B*, 189, 204-208 (2002).
- C. J. Ma, M. Kasahara, S. Tohno and T. Kamiya : A new approach for characterization of single raindrops, *Water, Air, and Soil Poll.*, 130, 1601-1606 (2001).
- M. Kasahara, C.-J. Ma, T. Kamiya and T. Sakai: Preliminary studies on applications of micro-PIXE to atmospheric aerosols, *Nuclear Instrument & Methods*, B181, 622-627 (2001).
- C.-J. Ma, M. Kasahara, R. Höller and T. Kamiya: Characteristics of single particles

sampled in Japan during the Asian dust-storm period, Atmospheric Environment, 35/15, 2707-2714 (2001).

C. J. Ma, M. Kasahara and K.C. Choi; Development of polymeric water absorbent film (PWAF) for the collection of size-classified fog droplets, J. Korea Soc. Atmos. Environment, 17, 17-24 (2001).

M. Kasahara, S. Akashi, C.-J. Ma and S. Tohno : Fixation and chemical analysis of single liquid particle, Nucleation and Atmospheric Aerosols 2000 (Ed. Hale and Kulmala), 736-739, Am. Institute of Physics (2000).

笠原三紀夫、明石幸子、馬昌珍、東野達、大西裕介:一粒一粒からみた雲粒や雨粒の物理・化学性状、環境技術、29, 11, 822-827 (2000).

## (5) 大気マイクロPIXE分析システムの開発

原研高崎TIARA 荒川和夫、神谷富裕、酒井卓郎、及川将一、佐藤隆博

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 石井慶造、山崎浩道、松山成男、杉本明日香、田中晃、小森祐嗣、大石幸裕

### 1. はじめに

通常のPIXE分析には、0.5～5mm程度のビームサイズが用いられており、元素分布測定における空間分解能は、このビームサイズに左右される。そこで、生物細胞試料や大気エアロゾル試料の2次元元素分布測定を実現するためには、マイクロビームを用いて $\mu\text{m}$ オーダーの空間分解能が必要である。ところが、マイクロビーム形成により、試料に照射する単位時間当たりの粒子フルエンスが減少するために、結果として発生X線量が著しく減少し、微量元素測定のために多大な時間が必要となるという問題が生じる。このため、大気マイクロPIXEにおいては、検出システムの高感度化が最も大きな開発課題である。

イオンビームを大気に取り出すための窓材としては高分子膜が有効であるが、一般的に高分子膜には各種充填剤・添加剤などが必ず含有しているため、これがバックグラウンドX線の発生原因となり、試料の分析に支障をきたす場合が多く、最適なビーム取り出し窓材の選定が必要である。また、マイクロビームを試料に照射する場合、試料位置を光学顕微鏡などで確認しながら照射台に取り付けられるが、光学的に観察した試料位置とビーム照射位置とは一致しないため、分析範囲を決めるビーム照準技術を開発必要である。

### 2. 高感度大立体角マイクロPIXE検出システムの開発

現在のマイクロPIXE分析システムでは細胞1個を分析するために数時間の測定時間が必要である。抗がん剤などの効果の検証には多数の試料の測定が求められ、測定時間の短縮が大きな課題となっている。一方、シンクロトロン放射光を用いたEXAFSやXANESにおいて高計数率を得るために、単一の半導体基盤上に数10～数100の微小な検出素子を形成したモノリシック型の多素子X線検出器が開発されている。そこで本研究では、測定時間の大幅な改善のためにモノリシック型検出素子を用いた大立体角多素子X線検出器を新たに開発し、検出器の立体角をできるだけ大きくすると同時に高計数率に対応させ、測定時間を短縮することを目指した。

この検出器では1検出素子当たりのカウントレートが少なくなるので、粒子ビームのラザフォード散乱のため従来は測定が困難であったマンガンやアルミニウムといったより軽い元素の細胞内分布の測定が可能となる。アルミニウムやマンガンといった金属元素の生体に対する作用については盛んに研究されており、アルツハイマー病や細胞のアポトーシス（自死）の機構解明に本研究で開発するシステムが役立つ。

### 装置の概要

図1に大立体角検出器の構造の概要を示す。

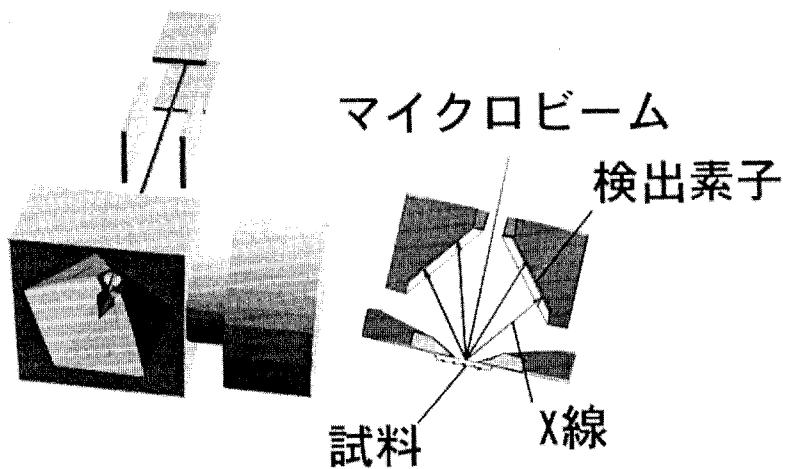


図1 大立体角検出器の概要

検出器中心部に設けられたパイプを通りマイクロビームが試料に照射され、試料から発生したX線はで試料を覆っている五角形のピラミッド型検出部で検出される。

図2に大立体角X線検出器の検出部を示す。

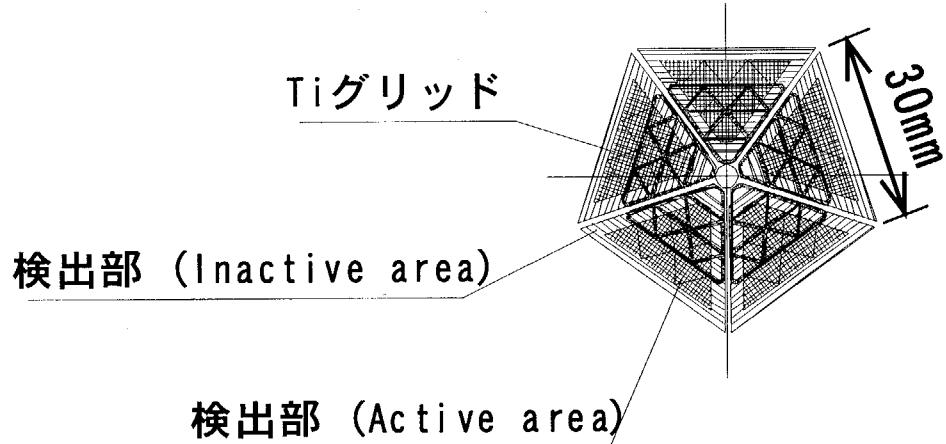


図2 X線検出部

五角形のピラミッドの各面は9個、検出器全体で45個の検出素子を有する。これにより、従来の10倍の検出効率の向上が得られる。さらに、従来から散乱陽子のストッパーとして検出器の窓部に設置していた有機薄膜を使用しないことで、AlやMgなどの比較的軽元素からの低エネルギーのX線も高効率で検出できる。この場合、高エネルギーの後方散乱陽子も検出され従来の検出器では不感時間が長くなるが、検出素子を多素子化しリセット方式の前置増幅器を併用することで、後方散乱陽子を検出による影響をその1素子の中に留め、他の検出素子はそのままX線を測定し続けることができる。

図3に大立体角多素子検出器を原研高崎研究所のマイクロビームラインに設置した様子を示す。

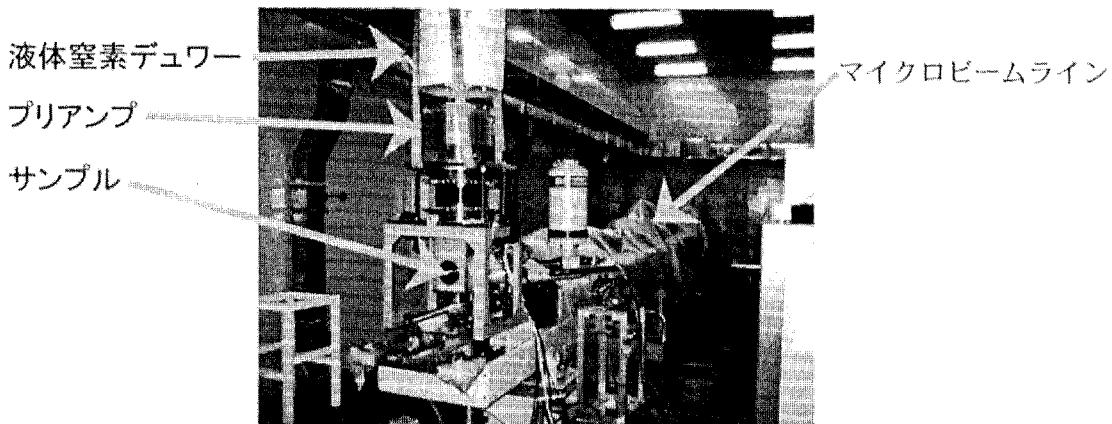


図3 大立体角検出器の外観

測定回路系はできるだけコンパクトにするため、マルチプレクサルータを用いて4つの素子からの主増幅器の出力を1つのADCに入力する。各素子からの信号はルータを通してADCへ送られるが、同時にルータからMCAへ、どの素子からの入力かの情報を送り、1台のADCで4つの素子からの信号を区別して測定する。また、各素子からの出力を2系統に分岐させ、1つはX線測定、もう1つはRBS測定用とすることが可能である。

このシステムを用いて、蚊の脚関節部のマイクロPIXE分析を行った。3MVシングルエンド加速器より発生させた、エネルギー2.0MeV、ビーム径1~2 $\mu\text{m}$ 、ビーム電流約100pAのプロトンビームを用いた。

図4にイオウの分布画像を示す。

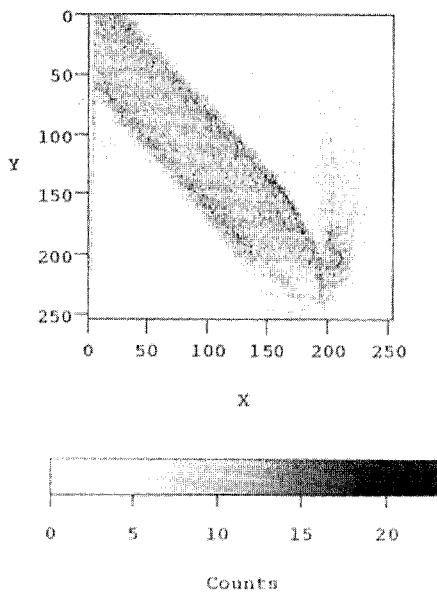


図4 蚊脚部のイオウの分布画像

検出器のエネルギー分解能が悪いため、PとSやKとCaといった特性X線のエネルギーが近い元素同士の分布を明確に区別することができない。検出器のエネルギー分解能の向上が必要である。

開発した検出器は主増幅器の増幅率を変えることで、後方散乱陽子を測定できる。また、多数の検出素子が試料を覆う構造となっているので、一度に多数の散乱角度の陽子を検出できる。

後方散乱陽子が試料内部で散乱され、検出器で検出される際のエネルギーと散乱角度から、試料内の主要元素の密度の情報が得られ、PIXEのみでは困難であった試料の深さ方向の情報が得られる。

今回は、アリの頭を試料とし、後方散乱陽子測定による3次元形状の把握を行なった。図5に試料として用いたアリの頭部の光学顕微鏡像を示す。

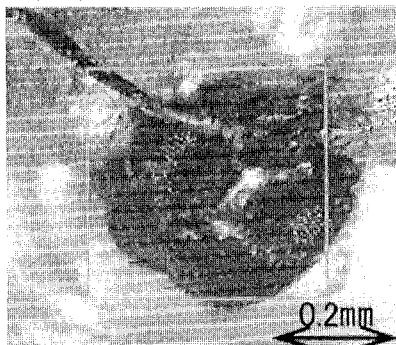


図5 アリ頭部の光学顕微鏡像

黄色の線で囲んだ部分が測定範囲である。

図6は散乱陽子の測定から得た、カリウム、イオウ、リンの密度分布である。白い部分が密度の高い部分を表わす。

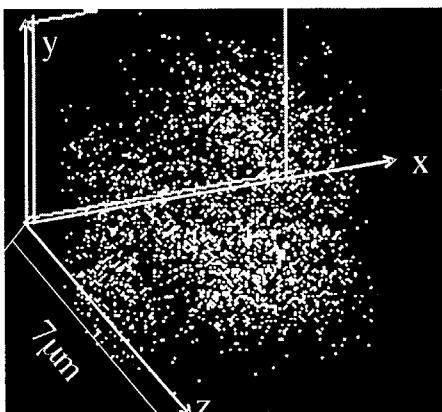


図6 後方散乱陽子測定によるアリ頭部の深さ方向の密度分布

このように散乱陽子を測定することで、 $7\text{ }\mu\text{m}$ の深さまでの試料の密度分布の測定に成功した。大立体角多素子検出器の開発を行い、試験的な測定として蚊の脚関節部を分析し、その結果、P、S、K、Caといった元素の元素濃度分布を得ることができた。本システムは従来のマイクロPIXEカメラの約10倍の感度を持っているだけでなく、45個の微小な検出素子で構成されているので、検出素子1つ当たりの後方散乱陽子の計数率を抑えることができる。細胞等を試料にした場合、細胞核等に含まれるごく微量な元素からのX線も検出可能で、現在数時間かかっている単一細胞内微量元素分布の測定時間の大幅な短縮が期待される。

また、X線だけでなく主要元素であるN、C、Oからの大量の後方散乱陽子も測定し、試料の3次元形状の把握を試み、 $7\text{ }\mu\text{m}$ の深さまでの試料の密度分布の測定に成功した。この技術は組織切片等の細胞が重なっている試料を分析する際に役立つと考えられる。

### 3. システムの最適化のための技術開発

当初、イオンビームを取り出すための窓材としては、機械的強度、入手・取り扱いの容易さ、耐放射線性及び耐熱性などの観点からポリイミッド（カプトン）膜を採用した。しかし、生物細胞資料を対象とした場合、ポリイミド膜には顆粒状のカルシウムが含有しており、細胞試料に含まれるカルシウムの分析に支障をきたすこと、及び親水性がないため細胞試料の取り扱いに不適当であることが判明した。そこで、細胞試料の重要な元素と同じ元素を含まず、かつ親水性処理が容易でイオンビーム照射にも一定の耐性がある高分子膜材を選定した。市販の高分子膜には各種充填剤・添加剤などが必ず含有しており、ほとんど使用できないことが判明したが、 $4 \mu\text{m}$ 厚みのマイラー膜が3MeVプロトンイオンビーム照射耐久試験、親水処理試験及びバックグランドX線測定試験等を行い、ビーム取り出し窓材として選定した。

マイクロPIXE分析のために、取り付けた試料を光学顕微鏡などで観察しながら位置調整を行うが、光学的に観察した試料のどの位置を分析するかを決めるビーム照準技術が必要である。本研究では、Si-PINフォトダイオードを用いて、直接ビームエネルギー損失を観測するSTIM( Scanning Transmission Ion Microscopy)法により、細胞試料のイメージ像を観測する技術を開発した。これにより、PIXE分析時に比べ約2桁低いビーム強度で大気中で細胞試料のSTIM像を得ることに成功し、大気中におけるビーム照準技術を確立した。

また、データ収集・処理系では、FTP (Fast Transfer Protocol) を構築し、新たに運用を開始した。これによりほぼリアルタイムで複数のPC間で同じデータを扱うことが出来、さらにユーザーがインターネットにより遠隔地から実験データを見たり（共有化）、実験に参加することが可能となった。さらに、X線エネルギースペクトルの2次元分布から任意の領域のエネルギースペクトルを抽出する機能を付加した。これにより、同時に測定した複数個の細胞やエアロゾル粒子の1個1個のX線エネルギースペクトルを得ることができ、個別粒子の分析が可能となつた。

### 参考文献

- [1] H. Oyanagi, M. Martini and M. Saito, Nucl. Instr. and Meth. A 403 (1998) 58.
- [2] H. Oyanagi, Proc. of Int. Workshop on High Flux X-ray Detector, Spring-8(1998)

### 発表論文

- 1) PIXE spectrum analysis taking into account bremsstrahlung spectra,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 150, 76 - 82 (1999),  
K. Murozono, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Matsuyama, and S. Iwasaki.
- 2) An Endurance Test of Kapton Foil in In-Air PIXE System,  
AIP, Conference proceedings, CP475, 480-483(1999),  
S. Matuyama, J. Inoue, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Iwasaki, K. Goto, K. Murozono, T. Sato,  
and H. Orihara.
- 3) An Open Experiment of a Submilli-PIXE Camera,  
International Journal of PIXE, 9, No. 1&2, 43-46 (1999),  
S. Matsuyama, K. Ishii, H. Yamazaki, S. Iwasaki, Y. Tokai, A. Sugimoto, H. Endo, T. Ozawa,  
H. Orihara.
- 4) Radiation Damage of Paper Samples in In-Air PIXE Analysis,  
International Journal of PIXE, 9, No. 1&2, 47-50 (1999),

- S. Matsuyama, H. Endo, K. Ishii, H. Yamazaki, Y. Tokai, A. Sugimoto, K. Yamamoto, T. Satoh, H. Orihara.
- 5) No Deterioration Elemental Analysis with In-Air Submilli-PIXE Camera,  
International Journal of PIXE, 9, No. I &2, 57-61 (1999),  
S. Matsuyama, K. Ishii, H. Yamazaki, H. Endoh, T. Satoh, K. Yamamoto, A. Sugimoto, Y. Tokai, H. Orihara, S. Yokota, A. Fujisawa, T. Sekine, Y. Nara, N. Chiba and T. Sutoh.
- 6) An external ion Microbeam for Studies of Biological Samples,  
Biological trace element research 71 -72, 77-82 (1999),  
T. Sakai, Y. Naitoh, T. Kamiya, S. Matsuyama, K. Gotoh, S. Yokota, H. Yamazaki, K. Ishii.
- 7) Development of In-Air Micro-PIXE Analysis and Data Sharing Systems in JAERI TAKASAKI,  
International Journal of PIXE, Vol.10, 91-95(2000),  
T. Sakai, T. Kamiya, M. Oikawa, T. Sato, A. Tanaka and K. Ishii
- 8) Investigation on the Influence of Back-Scattered Protons in PIXE Spectrum,  
International Journal of PIXE, Vol.11, 49-59(2001),  
T. Satoh, K. Ishii, S. Matsuyama, H. Yamazaki, Ts. Amartivan, A. Tanaka, S. Sugihara, Y. Komori, K. Katoh, T. Kamiya, T. Sakai and K. Arakawa.
- 9) JAERI Takasaki in-air micro-PIXE system for various applications  
Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B 190, 271-275 (2002),  
Takuro Sakai, Tomihiro Kamiya, Masakazu Oikawa, Takahiro Sato, Akira Tanaka, Keizo Ishii,

### 主な質疑応答

マイクロビーム照射では、荷電チャージアップの問題はないか。大気中照射のためチャージアップは起こらず、放電現象はない。実験時には細胞は死んでいる（死んでしまう）が、再現性は生きているときと同じであり、変わらない。SORでの実験と比較してどうか。SORではエネルギー依存がある。SORはバックグラウンドが低く、ダメージも少ない。しかし陽子ビームを使うと深さ方向の解析ができる。研究グループとしては最適な大きさで、発展性がある。主な質疑応答を以下に記す。

Q：マイクロビームでかなりのエネルギーが試料に入ることとなるが、チャージや熱を逃がす工夫をしているか。電子顕微鏡の場合はチャージが逃げるようカーボンなどを蒸着している。

A：プロトンなので試料を真空中に置くとチャージの問題が出てくる。しかし大気中なので、チャージがすぐ逃げてチャージアップは起きない。絶縁物を真空中に置いて実際 2.6 MeV のプロトンを照射すると、どんどんチャージアップして最後にパチーンと電子が放電する。そのためにバックグラウンドが出てしまい微量元素分析にならなくなる。ところがマイクロビームの場合には、チャージアップしてもどんどん電気が逃げるので放電現象はほとんどない。PIXEで真空中に絶縁物試料を入れると、放電でバックグラウンドが出てかわからなくなってしまう。この場合はプロトンでしかも大気中ということで、放電は起こらないので非常にきれいに見える。

Q：照射中、細胞は生きていると言つていいのか。

A : 死んでいる。最初は生きた状態で分析しようと思ったが、そんな甘くはなく死んでしまう。

ただし形状は生きている時とほとんど変わらないということが、最近の一年間の研究で確かめられた。生きた状態を凍結乾燥していくが、その間形状は全然変わらない。ビームで叩くとどうゆうことが起こるかと言うと、形はほとんど変わらないが、真空中では完全にペっちゃんこになる。ところが大気中だと同じ形を保っているが、表面がブツブツになって、表面の水が飛ぶみたいになって、少し形は変わる。表面があばたみたいに、あるいは月の表面みたいになる。形状が生きているときとほとんど変わらないことについては、自信を持っている。

Q : マイクロアナリシスで今 SOR が 1 ミクロン位まで焦点を合わせることができるようになっているが、感度はプロトンの方がかなり高いのか？

A : プロトンは全元素に対して感度が高いが、SOR はエネルギーが限定されることがあるが、どこを見るかでその使い勝手は異なる。もう一つはマイクロPIXEの方が安いと言える。

C : バックグラウンドは SOR の方がずっと低いが、かなりの元素量が、標的核の数がないと感度は低いと言うことになる。

Q : 大面積ディテクターでは同時にプロトンも測るということであるが、RBS で X 線を計る時にプロトンは邪魔にならないか？

A : 邪魔にならない。

Q : バックグラウンドは上がらないか？

A : バックグラウンドは上がらない。階段状のシステムになっていて、プロトンが入ってきて もグンと上がるが、10 何 MeV ぐらいまでのレンジを取っているので、例えばエネルギー 2.6 MeV 位のものを使うとリセットされるまで 7、8 個は検知できる。これは非常に賢い方法で、X 線と 1000 倍も違うシグナルを同時に検知できる。

Q : タンデムで実験やった時に普通のプレムスがあり、さらにじわじわと上がるプロトンのバックグラウンドが出てくるため、わざわざプロトンを除去するシステムを小林さん達作っておられたが・・・

A : 私達もオルテックの昔の検出器を使うとそれが出る。ユリシスのタイプのものではそれがない。実はそこまで進んでおり、ハイカウンティングレイトに減茶苦茶強くなっている。だから昔はラザホードプロトンが、1000 cps も来たらもうアウトだったが、今では全く大丈夫である。

Q : うまく原研のグループと大学のグループがドッキングして開発した、プロトンで元素の深さ方向分布を分析する技術は、SOR では難しいと思う。

A : SOR では無理である。

Q : そういう意味でマイクロPIXE は特徴があり、また私の印象では小さいグループで好き勝手に開発できるが、SOR は大きすぎあまり自由が利かないという気もする。

A : X 線に限ればマイクロPIXE だけであるが、プロトンやアルファなど色々なものができるので、マイクロビームはまだ発展性がいろいろある技術だと思う。

## 2.2.6 第4期研究の総括と今後の展開

名古屋大学大学院工学研究科 河出 清

4つのテーマのもとに行なった成果の詳細は個々の責任者から発表されているので参照されたい。主な成果と今後の研究の展開を述べる。

「劣化環境下における植物の養分吸収機構の研究」は5件のサブテーマのもとに行なわれ、これまで不可能であった植物が吸収した無機元素や有機化合物ならびに光合成（炭酸ガスの同化）産物の移行過程を秒単位の動画で示すことや分布の可視化が可能となった。必要なポジトロン核種標識化合物として、鉄など金属元素、窒素ガスを開発した。遺伝子導入イネやたばこを用いたトレーサー実験が可能となり、世界初の成果が得られた。特に、鉄吸収トランスポーターの働きを定量的に明らかにすることが出来た。また、亜鉛欠乏環境におかれたいネでは、亜鉛が植物体内を脈動するという現象が発見された。今後、空間分解能の一層の向上を計り、環境変動が特定の遺伝子発現を媒介として養分の吸収や光合成や窒素同化産物の移行に及ぼす影響の研究を進めれば、分子生物学レベルの事象と個体レベルの事象との関連付けの研究が期待できる。

これらの成果に基き、平成15年度より新たな連携重点研究として「ポジトロンイメージングによる環境に応答した植物栄養獲得機構の解析」が7件のサブテーマのもとに行われる。この分野は実験技術の開発段階から、具体的課題での展開研究を進める段階にあり、十分なマシンタイムが確保できれば、世界をリードしている現在の成果を飛躍的に延ばし、新しい学問の形成が期待できる。そのためには、専用の小型サイクロトロンの設置、PETISの増設など実験環境の整備が強く求められる。

「大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用」は4件のサブテーマのもとに行なわれ、高感度システムを目指した大立体角検出器を開発し、短時間での微量元素分析に見通しを得た。マイクロビームの応用研究として、生体細胞試料の分析技術の開発および細胞試料内の元素分布測定、エアロゾル分析への応用として微小雨滴の個別元素分布分析を可能とした。

連携重点研究として「マイクロPIXE画像技術の精緻化とその生命科学への応用」が8件のサブテーマのもとに行われる。今後、更に空間分解能の向上と共に二次元から三次元の立体分布測定技術の開発に向けての技術開発とこれによる新たな応用研究分野への展開が十分期待できる。グループには技術開発力があるのでハード面からの一層の研究推進により、実験手法の展開に応じて新規参加者が更に増加する趨勢にある。十分なマシンタイム配分が課題である。

「陽子加速器施設における放射線安全性に関する研究」は3件のサブテーマのもとに行なわれ、外部被ばく線量評価用基礎データとして軽荷電粒子の生成断面積データが取得でき、データライブラリーの妥当性が確認できた。高エネルギー放射線モニタ・線量計の開発では種々の特性試験・評価テストを進め、実用可能な測定器の開発の目処が得られた。

連携重点研究として「陽子加速器施設における線量評価に関する研究」が3件のサブテーマのもとに行われる。放射線管理・保健物理・医学利用分野で必要とされる線量評価の基礎データおよび検出器は多様であるが、取得データの意義や検出器開発の相互の位置付けを一層

明確にして研究を進めれば、新たな放射線安全管理学という学問の展開が可能である。

「材料照射損傷に対する核変換生成物の影響に関する研究」は5件のサブテーマのもとに行われ、低放射化フェライト鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、バナジウム合金、SiC/SiC複合材料、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 等の個々の対象に対する詳細な照射効果に関する知見を横断的に得ることができた。材料研究分野は相当の基礎データの蓄積があり、原子レベルからマクロ的な挙動に至る統一的理解や挙動予測への決め手となる新たなモデル化を立ち上げる段階に来ている。

本テーマの新たな展開として、原子炉炉心部等の構造材料の照射効果に関連した研究、TIARA連携研究「重照射場での材料の挙動予測と耐照射性に関する研究」が2件のサブテーマのもとに行われる。新たな研究手段と解析手法の発展に基づき、モデル化を含む研究の展開が期待される。

連携重点研究の新たなテーマとして上記の3テーマに加え「クラスターイオンビームと固体との相互作用および照射効果の解明」が6つのサブテーマのもとに新たに開始される。中高エネルギー・クラスタービームを用いた材料照射効果や物質との相互作用に関する系統的研究例は少なく、日本では始ったばかりである。非線形効果や協力現象のような効果が加わり、新たな効果が発生するものと期待される。

また、「多重ガンマ線検出と即発ガンマ線分析によるリアルタイム非破壊超微量元素分析法の開発と実試料への応用」が4つのサブテーマのもとに開始される。リアルタイムで中性子即発 $\gamma$ 線測定および短寿命核種放射化断面積断面積を超高感度で行うシステムの開発とこれによる放射化分析研究の新展開の可能性を探る。従来の分析感度に比べ3桁以上高感度なので、違った世界が見えるものと期待される。

新たな連携重点研究の開始に当り、(a) 研究推進の中心となるリーダーの存在、(b) リーダーシップを発揮できる制度と環境の確保として、分野や育ちの違う人が共通の場を持ち、新規参入者を集められるユーザー主体の制度、(c) 立ち上げ段階の課題も組み入れ、スクランブルアンドビルドを可能にする、(d) 世界で通用する人材育成が行えること、に留意したい。

第1期から4期までの成果を見ると、成果の出る分野が次々と入れ替わり現れてきていることが分かる。オンライン同位体分離器を用いた新同位元素の創製、トリプルビーム照射による材料研究、加速器施設開発に必要な核データの取得、植物ペットによる生体機能解明、マイクロビーム照射・分析、などそれぞれ世界で通用する一級の成果を挙げている。

施設と経費および院生を含む人材という公共財を用いて行う原子力の研究においては、大型研究施設を有する日本原子力研究所の存在感は益々大きくなる。一層の共用促進を期待する。

### 主な質疑応答

特になし

### 3. パネルディスカッション

原子力二法人の統合が検討されている中で新たな課題となっている、原子力新法人の研究施設利用と研究連携について、これまでの本プロジェクト共同研究での活動内容をふりかえり、今後の連携の効果的な方策を提言していくためのパネル討論を行った。各パネリストからは以下のタイトルで大学・原研プロジェクト共同研究の総括と今後の連携へ向けて行われてきた議論についての発表があった。これらの発表に基づいて、今後の連携の効果的な方策について議論が行われた。

パネリスト：座長 河出 清（名大）

- |            |                         |
|------------|-------------------------|
| ・田中 知（東大）  | バックエンド化学研究（1? 4期）の総括    |
| ・藤根幸雄（原研）  | 「融合研究」としてのバックエンド化学研究の構築 |
| ・渡辺 宏（原研）  | 放射線高度利用研究（1? 4期）の総括     |
| ・石井慶造（東北大） | マイクロPIXE分析プロジェクトの今後の展開  |
| ・伊藤泰男（東大）  | 連携重点研究のねらい（大学の視点から）     |
| ・渡辺博正（原研）  | 連携の今後の展開                |

#### 3.1 バックエンド化学研究（第1期—第4期）の総括

田中 知（東大）

##### 1. バックエンド化学研究の重要性

原子力エネルギーの平和利用は、その重要性が、国家エネルギーセキュリティ、地球環境問題、人類の生活レベルの維持・向上などの観点から、より強く認識されてよい。これは国としての責任であるとともに、関係する研究者の将来世代に対する責務ではないか。原子力エネルギーの平和利用を進める際に、安全の確保、社会・国民の理解、という観点の重要性は無論であるが、原子力エネルギーの平和利用を可能とする技術基盤の維持・発展の必要性を重く認識すべきである。原子力エネルギーの平和利用においては、原子力発電所の安全・安定操業とともに、核燃料サイクルに関する技術とそれを支える基礎基盤研究が重要である。すなわち、高速炉サイクルを見据えた核燃料リサイクルの研究開発と、放射性廃棄物の安全な処理処分に関する研究開発である。前者においては、近未来の課題としては、軽水炉使用済燃料の再処理と、プルサーマルがある。またそれらを踏まえて、中未来的には、魅力ある高速炉サイクルと関係しての、燃料、再処理方法の研究開発や分離変換技術がある。後者においては、高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価精度や安全性のより向上のための研究開発や、TRU廃棄物、ウラン廃棄物の確実かつ安全な処理処分に向けての研究開発が必要である。

##### 2. 基礎・基盤的研究と人材育成の必要性

このような核燃料サイクルの研究開発は様々な連携、横断的活動によって行われなくてはならない。大学は基礎研究、原研・JNCないし統合新法人は工学開発、企業・事業者はプラント規模の開発という整理もできようが、安易な役割分担論は、核燃料サイクル研究開発において相

応しくない。すなわち、アイデア、理論、人材を道具とし、学会などの活動をネットワークの糸とする、組織を超えた連携・協力が必要ではないだろうか。このとき、真の意味での基礎基盤的研究が必要であり、かつ、その遂行の中で原子力人材育成を図るべきである。真の意味での基礎基盤研究とは、原子力エネルギーの利用を十分に行え、廃棄物問題を十分に理解し、それを解決する能力がある人材には、技術および学術の十分な裏付けがあつてしかるべきという意味である。原子力エネルギーの平和利用においては、他の工学分野とことなり、目先の華々しさに惑わされない、技術者、研究者としての真のモラールと、原子力という社会からの関心が強いものに対する、崇高なモラルが肝要であろう。

### 3. 大学・原研バックエンド化学プロジェクト共同研究の必要性

上述のごとく原子力研究開発は国の責任のもと、それを構成する要素の有機的な連携により進めて行く必要がある。そのとき、大学、原研の内外において求められているのは、新しい核燃料サイクルに向けての基礎基盤研究、放射性廃棄物の処理処分を安全なものとするための基礎基盤研究である。またこれらには特にアクチノイド元素が関与することより、関連してのアクチノイド元素の化学に関する基礎研究である。これらの、研究では、実際に放射性物質や核燃料物質を使っての研究が必要である。また、学生の教育という点においてもこれらの施設を使っての教育研究は重要な意義を有している。しかし、各大学においてこれらの物質の使用施設を持つことは難しい。日本原子力研究所においては、放射性物質、核燃料物質を使用して研究が行える、貴重な施設と、その運転を可能にする、技術力、経験がある。同時に、これらを利用しつつ、重要な成果を挙げてきた優秀な研究者集団を有している。このように考えると、核燃料サイクルの基礎基盤研究、言い換えると、バックエンド化学研究を、有効に進め、より多くの成果を挙げるべく進めるには大学と原研が共同研究で一体となって進めていくことが他にもまして有効であることは自明に近い。

### 4. バックエンド化学プロジェクト共同研究の経緯と評価

このような理解により、昭和58年ころ、内藤先生を始めとする多くの関係者の人並みならぬ努力により、プロジェクト共同研究システムが検討され、昭和61年に第1期が開始された。異なる省庁に所属する機関が共同研究を行うことの難しさは非常なもので、その実現にこぎつけた先達の熱意には頭の下がる思いがある。大学と原研は現在同じ文部科学省に所属するので、これから共同研究はもっとやりやすくなるはずと考える。バックエンド化学プロジェクト共同研究を開始した時の状況やその後の経緯と成果は、1999年にまとめられた「大学・原研プロジェクト共同研究 成果と展望」（日本原子力学会誌 Vol.41, No.10, pp.993-1027 (1999)）に詳しい。検討当初の重要な観点に、大学と原研の協力関係の一層の追求、必要な研究予算の獲得、原子力長期計画において指摘された原子力基礎研究の重要性と、大学・STA傘下研究所の協力研究の遂行、およびプロジェクト的に対等の立場で研究を進めることの重要性がある。また、制度上の枠組みとして、大学と原研が対等の立場で進めることを前提に検討が行われた。プロジェクト共同研究の研究資金については大学、原研双方よりそれぞれ、科学技術庁（当時）、文部省（当時）に要求することとなった。原研よりの要求については認可される

ところとなつたが、大学（原子力研究総合センター）よりの要求は認められず、従来の原研施設共同利用予算の中で対応することとなつた。研究費については、科研費や民間共同研究での援助等の工夫が行われ、意味が大きいものではあったが、文部省によるお墨付きという意味ではやや不満が残つた。

バックエンド化学共同研究プロジェクトは、次に示す4つの分野について研究が遂行された。TRUリサイクルのための核化学的研究（平均課題数：4件）、燃料・廃棄物の固体化学的研究（平均課題数：5件）、再処理・廃棄物処理の基礎化学的研究（平均課題数6件）、廃棄物処分の基礎化学研究（平均7件）。第4期では、かなり大規模な見直しを行い、プロジェクト研究の副題も、アクチノイド元素の化学と工学とした。第4期での分類テーマは、アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質（3件）、アクチノイド元素の固体化学と燃料工学（2件）、アクチノイド元素の溶液化学と分離分析技術（4件）、廃棄物処理と環境化学（7件）である。

これまでのバックエンド化学プロジェクト共同研究について関与してきたものの一人として、私的な評価と反省を行うとすれば次のようになる。

#### 【評価】

- ① 我が国におけるバックエンド基礎研究進展に大きな貢献をした、
- ② 大学・原研研究者の共通の場が設置された、
- ③ 大学院生が実質参加し人材育成に貢献した（ホット実験従事、原研特別研究生制度等の活用）、
- ④ 興味ある、かつ重要な研究の進展が図られた、
- ⑤ 原子力以外の研究者の巻き込みが行われた。

#### 【反省点】

- ① プロジェクト性の欠如が指摘された、
- ② 社会的に重要な研究課題にどこまで応えたかやや疑問、
- ③ 大学における研究施設整備の不十分さ
- ④ 研究資金獲得の不十分さ

今後の共同研究の展開については、第4期の終了時点に、原子力重点共同研究（仮称）が研究者間で検討されたこと。それがそのままの形で実現できなかつたが、理想的な形と考えられることは既にバックエンド化学第4期の成果の総括と今後の研究の部分で述べた。

### 3.2 「融合研究」としてのバックエンド化学研究の構築

日本原子力研究所 藤根 幸雄

大学、原研の基礎研究を中心として、若い研究者の自由な発想と多様な関心を吸収しつつ、その情熱を国の研究開発プロジェクト、また、透明感を失っている原子力産業やエネルギー政策へも反映し得るような成果を発信できる連携活動が望ましい。そのような目標に向かって、バックエンド化学分野における大学と「新法人」との研究連携を強化する方策について、早急に関係者間で広く議論を始めることを提案する。その視点を以下に幾つか列挙する。

- ・ プロジェクト共研の後に、連携重点研究を発足させることが計画されており、将来への展望を含めて更に広く議論する必要がある。
- ・ バックエンド化学分野には、原研の基礎基盤研究及び関連する安全研究とともに、サイクル機構のプロジェクト研究も関係する。原研とサイクル機構を「新法人」へ統合する議論が進められており、両機関の統合を大学との共同研究にも反映させて行く必要がある。
- ・ 文部科学省が平成14年度から革新的核燃料サイクルシステム技術開発（公募研究）を新たに始めており、そこにおいて産官学の協力が重視されている。この動きを取り込む必要がある。
- ・ 現在、核燃料サイクル、廃棄物処理処分のバックエンド分野において、多様なアイデアに基づく基盤的技術を広く研究することが求められている。「新法人」は、バックエンドのホット研究施設を占有するとの観点から、大学や民間に研究する場として施設利用の機会を広く提供することが求められている。

平成15年度の連携重点研究課題として東大原総センターが公募した結果では、バックエンド化学研究分野に関する課題として、非破壊超微量元素分析、次世代再処理におけるアクチノイド元素の振る舞い、放射性核種の地中移行の3分野について複数のテーマが提案されている。しかし、最初の年でもあり、そのテーマ提案はいまだ部分的で、今後更により広範な研究者の参加を得て議論を進める必要がある。文部科学省の平成14年度公募研究の採択課題の広がりから見ても、大学と原研との共同研究として、もっと、広い範囲の課題提案があつても良いと思われる。

また、この連携重点研究は、原研の研究施設を利用することを前提に考えられているが、専門家の参加、また、必要に応じた施設利用においてサイクル機構も含めるようなことも考える必要があると考える。

このような意味において、「新法人」への融合を視野に入れつつ、バックエンド化学研究分野における大学連合と「新法人」との研究連携の強化について、バックエンド化学研究の関係者間で広く議論を進めることを提案したい。

### 3.3 放射線高度利用研究（1～4期）の総括

日本原子力研究所高崎研究所 渡辺 宏

#### 1. プロジェクトの特徴

放射線高度利用研究プロジェクトは、放射線高度利用研究計画が策定された翌年の昭和63年末にスタートした。その初期の狙いは、TIARAの完成前に先行研究を行うことによって、ビームラインなどの整備に役立てることと施設完成後の本格的研究に円滑に移行できるようにすることであった。放射線高度利用研究は世界に先駆けて材料・バイオ分野でのイオンビーム利用の推進を目指したものであったから、その目標に相応しいテーマを選定するために幾つかの評価基準が設定された。それは（1）優先して実施すべき学問的な意義（世界での当該研究の状況）、（2）新規立ち上げの必要性、（3）プロジェクトを組むことの意義、（4）大学側3グループ以上の参加を得て、効率よく実施できるか、（5）期間内に目標の達成が期待できるなどである。このような選定基準を設けて、出来るだけプロジェクトiveに研究を実施することを目指したところに放射線高度利用研究プロジェクトの特徴がある。

#### 2. プロジェクトテーマの実施経過

第1期（昭和63年末～平成5年度）は基本的に準備期間であったため、TIARA完成後の装置を利用した2年弱の研究を含めて、5年間で高分子材料・DNA修復・陽電子・核化学の4テーマが実施された。しかし、第2期の開始にあたって、プロジェクト研究期間は3年に設定された。それは研究の進展と組織の変化に柔軟に対応し、常にスクラップ&ビルトを心がけることが重要であるとの認識からであり、その考え方は今日まで継続されている。また研究を発展的に継続する場合には、これまで得られた成果と継続の必要性などを充分に評価することもテーマ選定の基準に加えられた。第2期（6年度～8年度）では高分子材料と核化学のテーマが継続され、新たに加速器遮蔽（5年度に開始）と材料解析法が加わって4テーマが実施された。第3期（9年度～11年度）では高分子材料を除く3テーマに、新たに核融合炉材料と植物機能の研究が加わり、5テーマが実施された。続く第4期（12年度～14年度）では、核化学と材料解析が終了し、3テーマが継続されるとともに、11年度から $\mu$ PIXEの研究が加わって、4テーマが実施された。従って、この15年間に9分野のテーマが実施されたことになる。

#### 3. プロジェクト共同研究の成果と評価

プロジェクト共同研究の成果を2つの視点（制度と研究成果）から評価してみたい。まず制度面からみると、（1）原研と大学の研究者が活発に交流し、研究結果を議論するだけでなく、制度上の問題点や協力のあり方などを広く議論することができたこと、（2）原研と大学が協力して先行研究を実施したことにより、研究者の意気を盛り上げ、計画の円滑な立ち上げができたこと、（3）「特別研究生」制度を優先的に活用することにより、大学・原研の両方で新分野の開拓に必要な人材の育成に貢献したことなどの利点が挙げられる。その一方で問題点としては、（4）プロジェクト共同研究と個々の協力研究との違いが明確でなく、プロジェクトに対する支援（マシンタイムの優先的配分、研究費・旅費などの優先的支援）が充分ではなかったこと、（5）事前評価と事後評価が充分に客観的であったとは言えなかったこと、（6）研究者間の交流や討論による研究の調整が研究リーダーとサブリーダーの資質に大きく左右され、リーダー選定の方法に課題が残ったことなどである。研究成果の点から見ると、

(1) 学術的に価値ある優れた発見や実用的に価値ある技術開発などがプロジェクト研究期間中に達成されたとは言えないが、(2) プロジェクト研究で蓄積された技術や着実に積み上げられた成果が基礎になって、プロジェクト終了後にRHEPDの成功、ナノワイヤ作製の成功、新機能蛋白質の発見、ステントの開発など大学と原研でそれぞれ大きな進展を見せた。また(3) 植物PETや $\mu$ PIXEなどでは、原研と大学が協力して技術の高度化や利用分野の拡大が図られている。一方、(4) 遮蔽データの整備や核融合炉材料の損傷解析など原子力を支える基盤研究の推進にも役立っている。元来、放射線高度利用研究計画はイオンビームを材料評価に使う研究と新しい利用技術を創造する研究を含んでいたから、全体計画の推進の観点から研究成果を見れば、プロジェクト共同研究は放射線高度利用研究計画の推進に大きな役割を演じたと言える。しかし、新しい放射線利用技術を創造し、学術や産業に役立てるという本来の放射線利用の観点から見れば、植物PETや $\mu$ PIXEなどの今後の発展に対する期待はあるものの、まだ充分な成果が上がったとは言い難い。

#### 4. 今後の連携のあり方

今後の原研と大学との連携を考える上で、15年前とは一変してしまった社会状況を考慮しなければならない。省庁統合で文部省と科学技術庁の縦割りの障壁はなくなったとはいえ、産学官の連携、競争的資金の拡大、研究員の流動化などの促進が謳われる状況にあって、従来にも増して原研と大学との密な連携が必要なことは明白である。一方、独立行政法人化が進む中で、科学技術政策における国の研究機関や大学の役割が明確になってきている。科学技術基本計画では、大学が新しい知の創造を求められ、国の研究機関が政策目標の達成と成果の普及・実用化を求められている。大学で発見された新しい原理が原研と大学と協力の中で育成され、更に企業との協力によって社会に役立つ技術として発展する、逆に原研の応用研究の中から発見された現象が大学と原研の協力で解析され、新しい原理・原則が導き出されるなど、本来両者は相補的な関係にあるはずであり、プロジェクト共同研究は時代を先取りして、この理想的な協力関係を作り上げる1つの模索であったのではないだろうか。しかし、現実には原研の先端施設と大学の人的資源の単なる結合だけに止まっていたになかっただろうか。原研側の担当者が多大な負担を強いられながら「原研は管理する人、大学は使う人」になっていなかっただろうか。両者が密接に協力しながらも、それぞれの使命を達成しようという意志がどれだけ働いていただろうか。プロジェクト共同研究は、我々が求める理想的な協力関係に適した制度だったのだろうか。まだまだ多くの問題が残されており、理想にはほど遠いように思う。従って、今後の原研と大学との連携を考える上で、このような問題点を具体的に議論し、反省し、改善しなければならないだろう。その上に立って、原研と大学との連携の理念を構築し、既存の概念や制度にとらわれない斬新で機能的な連携方策を作り出す必要があろう。

### 3.4 マイクロPIXE分析プロジェクトの今後の展開

東北大学大学院工学研究科 石井慶造

第四期の大学・原研プロジェクト共同研究「放射線高度利用研究」に、「大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用」が採択され、1年の前倒しで、平成11年度～平成13年度に本共同研究を実施してきた。本研究は、日本にマイクロビームシステムの技術がありながら、マイクロPIXEの研究が欧米に非常に遅れていたため、念願のプロジェクトであった。高崎原研のマイクロビームの技術と東北大学のPIXE技術が融合・協調して、諸外国を抜いて大気中のマイクロPIXE分析を可能にした。さらに、検出器の大立体角化を測り、超微量元素の検出による生物医学での発見的研究をめざすとともに、短時間分析により多量の試料の分析が可能となり臨床応用への道が開かれた。

マイクロPIXE画像の特徴は、細胞内の新陳代謝を画像として捉えることができる。今後は、このような代謝画像つまり細胞内の「分子イメージング」の技術開発を重点的に展開し、この技術を医学生物学に積極的に応用していく。しかしながら、生物医学研究の目的および内容は、扱っているものが生き物なので非常に多様であり、マイクロPIXEをこれに応用するには、それぞれの目的にあった分析技術開発を必要とされる。

このような研究目標を基に、連携重点研究の一課題として、「マイクロPIXE画像技術の精緻化とその生命科学への応用」を提案した。この課題に応募を希望した研究グループは、全部で14グループあった。そこで、グループを整理して、以下の8つのサブグループを構成した。

- 1) 大立体角マイクロPIXEによる細胞内超微量元素分析技術の開発とその生物・医学応用  
(石井班)
- 2) 生体試料分析用薄膜標準物質の開発と藻類試料への応用 (岩田班)
- 3) 微量元素動態による放射線照射後のアポトーシス検出と、癌治療、放射線被爆評価の開発 (原田班)
- 4) 歯質中のフッ素分布測定と抗う蝕性研究に関する臨床への応用 (山本班)
- 5) マイクロPIXE分析システムの高感度・高分解能化 (酒井班)
- 6) 大立体角マイクロPIXEによるホウ素・ガドリニウム細胞内分布の定量的分析の研究  
(松村班)
- 7) 斜出射X線測定による高感度PIXEに関する基礎研究 (辻班)
- 8) 各種病態における細胞内微量元素の解析 (長嶺班)

この中で、石井班は5つのミニグループから、長嶺班は3つのミニグループから構成される大サブグループである。

研究期間は、平成15年度から19年度までの5年間とした。各サブグループの研究遂行に当たっては、これまでの実績がもつ石井および荒川の研究グループが支援することとした。

8つのサブグループの15年度の研究計画は以下の通りである。

- 1) 立体角マイクロPIXEによる細胞内超微量元素分析技術の開発とその生物・医学応用  
(石井班)
  - ・大立体角検出器による高感度化と3次元分布画像化
  - ・ラット好塩基球性白血病細胞における金属イオンとアレルギー反応の相関

- ・歯学試料分析および植物細胞内毒素のマイクロ分析技術の開発
- 2) 生体試料分析用薄膜標準物質の開発と藻類試料への応用（岩田班）
- ・生体試料分析用薄膜標準物質の均一性
  - ・薄膜標準を用いる藻類試料の定量分析と元素分布の画像化
- 3) 微量元素動態による放射線照射後のアポトーシス検出と、癌治療、放射線被爆評価の開発（原田班）
- ・放射線照射後の細胞内微量元素動態とアポトーシス発生の関連
- 4) 齒質中のフッ素分布測定と抗う蝕性研究に関する臨床への応用（山本班）
- ・う蝕予防に有効なフッ素濃度の解析
- 5) マイクロPIXE分析システムの高感度・高分解能化（酒井班）
- ・マイクロPIXE分析の高感度化
  - ・マイクロPIXE分析の高分解能化
- 6) 大立体角マイクロPIXEによるホウ素・ガドリニウム細胞内分布の定量的分析の研究（松村班）
- ・培養細胞におけるホウ素・ガドリニウムの2次元における分布とその定量化
- 7) 斜出射X線測定による高感度PIXEに関する基礎研究（辻班）
- ・斜出射配置によるマイクロPIXE分析システムの開発
  - ・斜出射条件下でのマイクロPIXEマッピング法の開発
- 8) 各種病態における細胞内微量元素の解析（長嶺班）
- ・各種培養細胞（癌細胞、正常細胞）試料のターゲット調整技術の確立

これまで、マイクロPIXEの技術開発は、主として工学者サイドで行ってきた。上記のように、非常に多くの医学研究者との連携研究が始まり、マイクロPIXE技術の医学への直接の応用の段階に至っている。特に、高齢社会を迎えた今日、3大老人病の最も死亡率の高い「がん」の撲滅のための応用研究の成果を期待したい。

## 3.5 連携重点研究のねらい（大学の視点から）

東京大学・原子力研究総合センター 伊藤泰男

原研の大型研究施設等を大学の研究者が利用することについては、次世代の人材を養成する責任を負っている大学が、国民の貴重な財産である大型研究施設を使って、原子力の基礎と応用に関する研究を行い、これと表裏一体して教育に役立てる必要があるとの認識に基づいている。それをどのような方法で行うことが良いのかが問題の要である。

原研の大型研究施設等を産学の研究者が利用するための制度としては「原研施設共同利用」があり、昭和33年にJRR-1が所外共同利用されたのが最初である。この共同利用制度は、研究炉、ホットラボ、電子線リニアック（シャットダウン）、コバルト60γ線照射施設（東海研の施設はシャットダウン）、電子線加速器、イオンビーム照射施設などについて、利用料金を代価として共同利用に供されることが認可されているものである。この制度では、大学人は大学では所有することのできない大型研究施設を、大学なりの自由な発想をもって利用することが可能となる。昭和36年から東京大学（原子力研究総合センター）を窓口とする大学の原研施設共同利用が文部省予算によって支援されてきていることによって、多くの研究者がその恩恵を被ってきた。

表一

原研施設共同利用  (指定施設利用)	利用料金 を支払って 利用する	大学の自由な発想に基づく施設利用  <u>大学内で取り仕切ることが出来る場合</u>  大学開放研究室方式が有効（中性子散乱・放射化分析など）
		<u>大学内で取り仕切ることが難しい場合</u>  単純照射などに限定され、高度な利用はできない。
大学・原研プロジェクト 共同研究	50／50	(原研における)運用の土台は「協力研究」 (プロ研は協力研究とどう違うのか?) 予算の制約 (得に大学側) “共同”の意識と実態が多様
協力研究	原研の研究に 協力するもの	原総センターは一時期、協力研究制度を積極的に活用し支援した。

原研施設共同利用制度では、大学連合でかなりの程度まで取り仕切ることが出来る場合と出来ない場合がある。前者の場合は、「大学開放研究室」方式が有効で、その自主的な運営によって、自由な発想に基づいた研究を展開させることができる。中性子散乱や放射化分析などの現在の活況は、このようなものとして強調して良い。

しかし、その分野での大学人の人口が少ない場合、あるいは研究施設に付帯する諸設備の多くが原研所有の物で大学が采配を振るう自由度が少ないなど、大学で取り仕切ることが出来な

い場合も少なくない。そのような場合に原研施設共同利用を適用すると、単純照射のような簡単な利用に限られて、高度な利用は望めない。

更に、共同利用制度は供される施設の数において制約がある。また研究所の研究者と共同する視点が欠如しているため、原研は共同利用の「営業責任」を果たすこと以上の努力を傾けるモチベーションはなく、研究所であることの特徴が共同利用に及ぼされて相乗効果を上げることは少なかった。

昭和43年に「協力研究制度」と「指定施設制度」が生み出された。「協力研究制度」は“原研の研究に協力するもの”という性格づけであるが、原研施設利用共同研究委員会（原子力研究総合センター）はこの制度を積極的に利用することを支援してきた。これは「協力研究制度」をいわば手前勝手に利用するものであった嫌いがないでもなく、原研と大学間の理解の食い違いのために摩擦を引きずりながら行われた例も少なくない。

「指定施設利用」が行われた実績は無い。対価を支払って利用する点では「原研施設共同利用」と同じであり、共同・連携という概念が無いなかで、外部の者が自在に原研施設を指定して利用することは不可能に近い。

このような中で、「大学・原研プロジェクト共同研究」が考えられたのは当然の成りゆきであった。これは大学、原研双方が50：50を原則として真の共同を目指し、双方の連携の場としても唯一のものであった。昭和58年から準備され、61年度から開始された本制度は、17年間の長期にわたって行われた。その経緯と評価は他のパネラーにゆずるが、これによって大学で出来ない研究を行うことができ、学生の教育の場としても有効であった。原研の不足するところを大学の広いスペクトルに求めることは、原研にとっても大きいメリットであった。このように双方補い合い、刺激しあって、協力することを大いに享受した人々は少くない。研究成果においても、見るべきものが多かった。

しかし、これまでのプロジェクト共同研究で問題がなかったわけではない。原研では手持ちの制度（協力研究制度）を運用することでこれを実施しようとしたことが意識の上でも実体的にも理念の足を引っ張ったこと、予算面では、原研ではプロジェクト共同研究関係の予算は運営のための予算（と設備費）が主で研究旅費ではなく、大学では原研施設共同利用の予算から運用した旅費・研究費がわずかでしかなかったこと、そして、このような脆弱な構造に加えて、原研と大学の研究者のスタイルが異なることが十分了解されていなかったこと、などであろう。大学の研究者は、自由な発想に基づいた主体的な利用を“勝手放題”とはき違える傾向が無かったとは云えない。加えて、同じような施設利用に複数の大学研究グループが個別に参画し<sup>1</sup>、原研側で対応する研究者に負担を集中させることができたり前のように起こった。大学の活性が高すぎると、原研の研究者から見て“成果を奪い盗られる”という拮抗関係も発生する。かくして“原研は大学の研究者にサービスをする必要があるのか？”という問題意識が原研に自ず

<sup>1</sup> 協力研究との区別があいまいであったこと、大学側のリーダーシップの下でまとまるということが出来なかったことの現れである。

と生まれる。原研の研究者に負担が集中すると、やむを得ず原研が大学に研究を丸投げする形も生まれる。丸投げと見た大学研究者は、ならば原研は研究費を十分に保証して良い筈だとの期待を抱く、というように、食い違いが次の食い違いを生む。丸投げの逆の例として、大学から原研に学生が丸投げされることもある。

それやこれやの問題は、大学と原研のギャップを知りあうことをせず、それぞれの勝手な思惑を結合しようとしただけの結末である。プロジェクト共同研究そのものに欠陥があったことにはならないが、いろいろな意味で未熟であった。しかし、“将来の創造的な科学技術の基盤となる基礎的研究活動の効率的推進を目指し、甲と乙とが双方の使命にとって重要な研究プロジェクト（テーマ）について共同で研究を行うことを目的とする”（大学・原研プロジェクト共同研究 基本協定書第1条）と記された、理念の重要性は変わっていない。

以上の経緯を背景に、改めて「連携重点研究」と名称を変えて原研と大学の共同・連携を行うことが合意されようとしていることは喜ばしい。しかしあれど、共同・連携への新しい基盤が固められてのことではない。その意味では、問題はこれまでと同じである。よき理念はそれにふさわしい制度によって支えられなくてはならない。とりあえずのシステムを運用して、などと安易な方針をとるのではなく、これまでの経験を活かさないことになる。

ここでいくつかやや細かい指摘をしておきたい。

- ・ 「連携重点研究」を組み立てるにあたって、研究成果をあげることだけを先行させるやり方をすると、“盗る/盗られるの関係”を引きずり続けるだろう。
- ・ 最も重要なことは、産学官の風通しを良くする場を確立することである。大学と原研のギャップを認識した上で、共同の理念を常に意識に上らせることのできる場があるかないかが基本であることを認識したい。
- ・ 前記のような場があることによって、大学人の奔放な身勝手も適切にコントロールされ、かつ活かされるだろう。
- ・ 真の研究課題もこのような場で揉まれることなくしては生まれないだろう。これまでのプロジェクト共同研究では研究課題はトピックス的・場当たり的に選ばれ、プロジェクト性という点では不満があるものが多かったのは、この場が機能していなかつたためではないだろうか。

ところで、以上のように「連携重点研究」は極めて重要であるが、大学にとってはそれが全てではない。放射化分析、即発 $\gamma$ 線分析、中性子ラジオグラフィー、中性子散乱などのように、広い分野に多くの利用者が居て息長く続いているものでは“重点化”は馴染まない。萌芽の段階にあるものも「連携重点研究」に馴染まない<sup>2</sup>。また生物照射実験のように原研にポテンシャルの無い研究も、大学側で自立と主体性をもって取り組む必要があろう。従来の原研施設共同利用のように大学の自由な利用にまかせておいた方がよい部分と、原研の研究者と連携して重

<sup>2</sup> 日本原子力研究所の公募型「黎明研究」は、大学の自立性の外にあるという理由で、ここでは考慮外とする。

点的・組織的に取り組んでいくべきものとを、バランス良く併置させる必要がある。

「原研施設共同利用」と「連携重点研究」という2つの形態を通して、いろいろな意味で広いスペクトルを持つ大学研究者を、原子力研究法人の研究施設の場に引き寄せ、活性化させ、開花させ、原子力技術とその利用の広範化に貢献させるのである。研究と教育が表裏一体している大学では、このことが教育において持つ意味を改めて問う必要はない。

一方、大学研究者のこのような寄与は翻って原子力研究法人の研究者に対して、研究のモチベーションに刺激を与え、研究行為を助長・補完するなど、個々の効果をもたらすことはこれまでの実績の示すところである。しかしこのような局部的な効果だけでは小さいと云わざるを得ない。大学との連携の中で、原子力研究法人の研究施設が、その真価を發揮して国民の預託に応えられている姿を現すことこそ重要である。

原子力二法人統合後の施設の共用が大きな課題となっている今をチャンスとして、このような理念に向けて検討が進められることを切に願う。

## 3. 6 連携の今後の展開

原研 渡辺博正

## 1. 背 景

- ・ 第2期科学技術基本計画・・・科学技術創造立国をめざして
- ・ 原研と核燃料サイクル開発機構との統合・・・整理合理化計画の一環
- ・ 原研：科学研究費補助金交付の対象となる「研究機関」として大臣指定

## 2. 今後予想される状況の変化

- ・ 政府の研究開発に対する投資額の増大
- ・ 研究開発資金の「4重点分野」への優先的配分
- ・ 研究開発資金の受け皿として「産・学・官」連携コンソーシアムが有望
- ・ 「産・学・官連携」は新法人の基本理念の一つ
- ・ 原子力研究施設の新法人への集中：研究資産の外部活用の期待増大
- ・ 原子力研究施設等：公共財としての共用促進が「業」として必要

## 3. 原子力二法人の統合に関する基本報告

- ・ 世界の最先端を目指した原子力の基礎・基盤研究の取り組み
- ・ 核燃料サイクルの確立を目指した原子力エネルギー研究開発の推進
- ・ 基盤的・先端的原子力施設等の整備とその共用促進、人材育成への貢献

## 4. 大学、産業界等との連携・協力の推進

- ・ 原子力二法人統合準備会議（基本報告）から求められる役割：大学、産業界との連携・協力の充実・強化及び研究施設等の共用促進
- ・ 大学関係者からの要望：対等の立場での連携、施設等の共用促進、共同利用研究の場の整備・拡充、斬新で機能的な連携の場の構築
- ・ 役割、要望に対する対応：大学、産業界等との交流促進、連携・協力の充実・強化を図る「場」の構築→「产学研官連携推進委員会（仮称）」の設置
- ・ 具体的活動の一環：「产学研官連携重点研究（仮称）」の実施

## 5. 新しい研究協力の仕組み

- ・ 名称：产学研官連携重点研究（仮称）
- ・ 位置づけ：产学研官の有機的連携、先進的施設等の効率的利用、外部資金の有効活用、研究テーマの重点化
- ・ 仕組み：研究課題の公募、実施体制の確立、委員会評価（事前、中間、事後）、研究費の相互負担（外部資金の協力的獲得）
- ・ 運営方法：共同研究規程の下で運用、窓口の設置、委員会評価、各施設利用の制度による研究実施、費用の当事者負担原則

(以上は、原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会「新しい研究協力のあり方について」の要旨を示したものです。)

### 3. 7 議論のまとめ

前述の各パネリストからの基調講演に基づき、今後連携を効果的にやるのはどうしたらいいのか、何をどのようにやるのがよいのかという枠組みについて議論し、会場から多くの意見が寄せられた。主な論点を以下に纏めた。

#### 1. 何について連携する必要があるのか

- ・今後の「連携重点研究」の思想自体は非常に良いと思う。(会場参加者)
- ・システムについて結構議論したが、結局14年度からスタート出来なかつたのは残念であった。本当の新しいシステムを作る時の、いろんな境界条件について十分議論したのかということなど反省すべき点があった。(パネリスト田中知)
- ・今度の連携重点研究制度について提案されているテーマを見ると、公募型研究、競争的資金とどこが違うかという疑問が生じる。(会場参加者)
- ・プロジェクト共同研究と一般の共同研究や協力研究と何が違うか、またプロジェクト共同研究の特徴をどう生かすかという観点で問題意識を持って進めてきた。(会場参加者)
- ・何が一番大切なを考えると、世界のトップレベルの研究を追求することではないか。そのためには一流の施設の整備や開発が必要であり、かつ大学と原研の協力がないと出来ないだろう。汎用な施設は世界の一流にはなかなかならない。原研での色々な研究は今や世界的に一流の仕事として受け入れられており、世界のトップレベルを走る研究所といえる。それが可能なのは世界で一流の施設の開発が出来ているからである。私の関係で言うと、JRR-3Mの即発ガンマ線分析とか冷中性子の施設は間違いなくトップレベルであり、また大気マイクロPIXE分析装置や重元素化学関係のタンデム加速器周辺の研究も世界一、二を争うレベルであろう。こういうトップレベルの研究をプロジェクトとしてさらに育てるのが大切であり、こういう研究に学生を巻き込むのが一番大切と思う。(会場参加者)
- ・根本は原研であろうが大学であろうが税金でやっているということを再認識しなければいけない。原研が獲得した金だから我々のものだと、大学は単に使わせていて欲しいというようなことでは困る。我々は国民に対して責任を持つのであって原研に対して責任を持つわけでもなければ、大学に対しても責任を持つのではないという姿勢で見直すべきであろう。成果が上がったといっても、投入した金額に対してどうであったかという厳しい姿勢も必要であろう。しかし、このような観点からだけで判断出来ない研究テーマもある。例えばバックエンドがそのようなテーマであり、考慮しなければならない。一方、放射線高度利用研究は、大いに自由に競争力を持って原子力分野だけじゃなく他の分野でも競争してほしい。(会場参加者)
- ・バックエンド、サイクル関係は、文科省と経産省から、かなりお金が付くところには付いているが、逆にこのプロジェクト共同研究ではお金が付かないが重要なテーマがあり、そこをちゃんとやっていくことが必要かと思う。(パネリスト田中知)
- ・いろんなシステムが乱立して、どうゆう研究はどのシステムを使ってやっていくのがいいのか考えるべきである。例えば廃棄物の安全研究をどうしていくのか等考えると、サイクルと原研と大学と、大きな視点で見ているところがない。(パネリスト田中知)

## 2. 効果的な連携の仕組みとは？

### (共通の場)

- ・新しい「場」方式は十分に議論すべきである。大学も原研も国もいろんなところで条件が厳しくなってくる中で、本当にこの共同研究はどうあるべきかというのをここ半年位で真剣に議論すべきだろう。（パネリスト田中知）
- ・大学と原研なり新法人の有機的な結合の「場」をどう保障していくかということが重要である。有機的な研究面での結合という時に、どうゆう研究が今必要であるかということをもう少し戦略的に考えていく、このような検討を行う場を保障することが重要である。また。ホットも含めて先端的設備が新法人に集中するとするならば、今後するべき研究内容との関連で、どういう設備を整備すべきかというところまで含めて議論する「場」が保障されなければならない。単に研究テーマを募集してというやり方だと、公募型研究などの方がどんどん予算がつくし、嫌でも我々自身もそうゆうものに応募していくから、そちらの方に力がどんどん注がれてしまう。この点について特徴を出せるような制度にした方がいい。（会場参加者）

### (人材育成)

- ・今何が重要なことを考えると、1つは人材育成であり、いかに原子力分野での若手を育てるかということである。これまでの特研生制度は非常に役立っていたと思っており、これをもっと有効に生かす方策、制度を考えるべきであろう。（会場参加者）
- ・世界のトップレベルの研究を目指す中で、学生が触発されて伸びていくのだろうと思う。学生の教育を原研に丸投げするのではなく、研究室で社会人として研究を進めていける資質を養いつつ、優秀な学生が参加し伸びていけるような制度としていくことが必要であろう。（パネリスト河出）
- ・人材育成はよくよく中身を考えないといけない。いろんな大学の人が原研に人事交流とか人材交流で来ることは良いことであるが、人材育成や教育は独法化の中で大学の重要な使命と考えられており、大学が責任を持ってやるべきことであろう。（パネリスト田中知）
- ・プロジェクト共研は研究上大変役立ったし、若い研究者にとっても刺激となった。（会場参加者）

### (施設)

- ・世界のトップレベルの施設のみでやっていくのではなく、古くからある原子力施設も、研究の裾を広げるためには絶対に残しておくべきである。（会場参加者）
- ・物性研も原総センターの傘下で原研のJRR-3を利用した中性子散乱実験に40年前から参加してきたが、10年位前にやっと一人立ちして物性研が全国共同利用の窓口という形で中性子散乱研究施設を東海村に作り、年間7000人・日のユーザーの面倒を見るまでになった。その時に一番重要なことは、我々スタッフが現場において東海村に住み着いて原研の人達と一緒に原子炉の利用に関わるということである。新しい連携重点研究を始めるのであれば大学の方は責任を持って1人の職員を貼り付けるぐらいの気合いを入れてやることは一つのポイントであろう。20年前から行っている日米協力中性子散乱研究という協力事業は、対

等の立場で双方が共同研究を行うという考え方の基に大変うまくいっているが、そのポイントはやはり日本から1人長期滞在して相手側と協力しながら装置の維持管理を行い、併せては人間的な関係を築きつつ協力研究を行っていることである。やはり人間が基本であり、1人必ず長期で1年間順番に送っていることが非常によく機能してきた。その時、参加する学生を前もって社会人として、また英語能力や人間的な面でもよく教育しておくのが大事である。原研と大学との協力関係もやはり人間が一番基本だと思っており、装置はもちろん良いものを作らなければいけないけれども、やはり1人常駐の人を送るぐらいの器量を持って大学側がコミットするということが重要である。(会場参加者)

## (運営)

- ・原研がトップレベルの研究活動を維持し、あるいはトップレベルの装置を有しているということであれば、海外のトップレベルの研究者も連携研究の中に容易に参加できるようなシステムを作るべきである。国内・外国区別しないというやり方である。(会場参加者)
- ・独法化に向けて産官学連携は大切であるが、具体的に産業界の参画を得るのは我が国では容易ではなく、産業界をどうやって入れていくか難しい問題である。日本の産業界の体質として囲い込みの傾向があり、協力して新産業を立ち上げることの難しさがある。これからの日本の科学技術、産官学連携をいかにうまくやるかは非常に大きな課題である。(会場参加者)
- ・15年の経験を生かして、新しい仕組みを構築する必要がある。つなぎのシステム、共同研究の仕組みをどういうふうにするかは、紆余曲折はあるが原研施設を効率的に活用し、また外部資金導入にたよらざるをえないのではないか。(会場参加者)
- ・統合までは大学側は原総センターが窓口業務を引き継ぐと思われるが、これから2年間継続的にきちんと議論しないといけない。特に原総センターの役割は重要な継続審議事項と考えている。(会場参加者)
- ・共同研究グループを柔軟に編成できるようなシステムにするということ、一番大事な要素である人が中心でやっていけるシステムにすることが重要である。双方が対等の立場で今後ともお互いに言いたいことを言いつつ、なおかつ自立して研究を進めるべきである。発見につながる研究や国民に還元できる研究のための制度とすべきである。(パネリスト河出)

以上のとおり、パネリストの方々だけではなく会場の参加者から多くの貴重な意見が述べられた。本日の議論を通して原研と大学がそれぞれの立場での持ち味を活かして協力と連携を進めていくことの重要性が確認されるとともに、より効果的な連携システムを考える上で(1)連携を進める共通の議論の場の提供、(2)世界のトップレベルの施設でトップレベルの研究を実施できる場の提供、及び(3)研究を通しての人材育成の場の提供の重要性が認識されたと言える。

#### 4. 閉会挨拶

原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会委員長、原研 岩本 昭

本日の発表を聴いて、15年以上にわたるプロジェクト共同研究の成果が凝縮された形で報告され議論されたという印象を持った。今にして思えば、fifty-fiftyという対等なシステムを立ち上げたのは、時代を先取りしていた面が十分にあり、先駆者の努力に敬意を表したいと思う。実際この制度の下で、いろいろな研究が進展したということのみならず、特研生などの制度を通しての人材の養成とか、TIARAなど原研の施設の立ち上げに効果を發揮したと信じており、本制度を立ち上げていただいた先輩に感謝する次第である。

本制度、プロジェクト共同研究は、ある意味で時代を先取りした制度であるが、やはり一つの制度で長い間何も変えずにいると、どうしても制度というものはある種の疲労を起こすのではないかと思う。たらいの水は時々換えてやらないといけないが、たらいの中にいる一番大事な赤ちゃんは絶対流してはいけない。やはり水は時々何らかの形で替えるというのが一番の基本ではないか。

一方、行革の一環として、我々にとっては大きな変化の機会でもある二法人統合が行われるという状況にあり、また産学官連携の強化や競争的資金導入の促進といった流れがあるわけで、この流れの中で一番良い制度を立ち上げるという立場からプロジェクト共同研究を見直して、何か新しい本当に良い制度を立ち上げていくというのが、我々に課せられた使命であると考えている。

実際にこの連携重点課題のような中で出てきた課題、それから今日講演していただいた課題を見ると確かに非常に良い提案がたくさんあると思う。原研では、部の縦割りなどでなかなか連携した研究が進まないことがあるが、この連携重点研究が少しずつ変えていく一つのきっかけになるのではないかと思っている。また、大学と議論を戦わせるような共同の場が絶対必要であること、その根底にはこのプロジェクト共同研究という場が共同の場として機能していたこと、今後ともこれを絶対に保持しなければいけないというような主旨の意見が出された。さらに、原子力についてはテーマが細分化されているが、そういうものを打ち破るために制度として、連携重点研究を位置付けていくことも大事である。

この共通の場が不可欠だと考えている理由は、新法人がスタートしてTIARAなどの大型施設の共用などを考えるとき、利用者の声がきちんと届くようにする意味で共同の場が必要であるからである。この共同の場では新法人での研究や、人材育成など共通の課題を議論する場として、またそれが産業界との接点も含めた議論をする場としても重要である。その意味でバックエンドと放射線高度利用の二つに分野を限定することなく、もう少し広い原子力、これからの中の原子力という意味では非新しい制度を考えしていく必要があると思う。確かにプロジェクト共同研究に関する大学との基本協定は精神的な協定で今後とも通用するものであるという議論がありましたが、より具体的な制度を考えていく必要がある。

本日の議論から、新しい制度を考える基本的な立場ははっきりしていると思われる。即ち世界の最先端を切り開くような発見につながる研究をどうやったらできるかということと、国民にどうやって還元できるか、還元できる研究をどうやって行うかということの二つの基本は本日大勢の方が言っておられたし、たぶん間違いない原則だと思われる。これから具体的な制度

を検討するという大きな課題があるが、本当の基本原理は決まっていると思っているので、ここに至るまで私がやっていた検討部会についても田中先生、河出先生、田川先生、伊藤先生、石井先生などの特別なご協力に感謝している。そういう観点で新しいより時代にあった良い制度を作りたいと思いますので、今後ともよろしくお願ひいたしたいと思います。

付録 1

原研・大学プロジェクト共同研究シンポジウム

「核燃料サイクルにおけるバックエンド化学」  
「放射線高度利用研究」  
—第4期プロジェクト共同研究の成果と今後の展開—

日時：2003年2月18日（火） 10:00—19:00

会場：東京大学 山上会館 大会議室

開会挨拶 中沢正治（原研施設利用共同研究委員会委員長・東大）

10:00—10:05

(セッションⅠ) バックエンド化学 第4期研究成果のまとめ

10:05 I-1 バックエンド化学第4期研究のねらい

(座長) 館盛勝一

10:15 I-2 アクチノイド元素の核化学的性質と物理化学的性質  
篠原伸夫(原研)

10:40 I-3 アクチノイド元素の固体化学と燃料工学の研究  
中村彰夫(原研)

11:05 I-4 アクチノイド元素の溶液化学と分離分析技術  
—アクチノイドの電気化学的基礎物性—  
木原壯林(京都工芸繊維大)

11:30 I-5 廃棄物処分と環境化学  
長崎晋也(東大)

11:55 I-6 成果の総括と今後の研究展開  
田中 知(東大)

休憩(12:10? 13:10)

(セッションⅡ) 放射線高度利用 第4期研究成果のまとめ

13:10 II-1 放射線高度利用第4期研究のねらい

(座長) 河出 清(名大)

13:20 II-2 陽子加速器施設における放射線安全に関する研究  
—高エネルギー中性子モニタ用検出器の開発—  
山口恭弘(原研)

13:45 II-3 材料照射損傷に対する核変換生成物の影響に関する研究  
實川資朗(原研)

- 14:10 II-4 劣化環境下における植物の養分吸収機構の研究  
森 敏（東大）
- 14:35 II-5 大気マイクロPIXE分析システムの開発とその応用  
石井慶造（東北大）
- 15:00 II-6 第4期研究の総括と今後の展開  
河出 清（名大）

休憩(15:15-15:30)

(セッションIII) パネルディスカッション

大学・原研プロジェクト共同研究の成果と今後の連携の効果的な方策について

15:30-17:15

座長 河出 清（名大）

パネリスト

- ・田中 知（東大） III-1 バックエンド化学研究（1-4期）の総括
- ・藤根幸雄（原研） III-2 「融合研究」としてのバックエンド化学研究の構築
- ・渡辺 宏（原研） III-3 放射線高度利用研究（1-4期）の総括
- ・石井慶造（東北大） III-4 マイクロPIXE分析プロジェクトの今後の展開
- ・伊藤泰男（東大） III-5 連携重点研究のねらい（大学の観点から）
- ・渡辺博正（原研） III-6 連携の今後の展開

閉会挨拶 原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会委員長 岩本 昭（原研）

17:15-17:20

懇親会（17:30-19:00）

## 付録 2

## 1. 原研側組織

## (1) 平成14年度 原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会名簿

職名	氏名	所属および職位
委員長	岩本 昭	原研 東海研副所長
委 員	近藤 駿介	東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻 教授
"	田中 知	東京大学大学院 工学系研究科 教授
"	河出 清	名古屋大学大学院 工学系研究科 教授
"	数土 幸夫	原研 高崎研究所長
"	安岡 弘志	原研 先端基礎研究センター長
"	館盛 勝一	原研 東海研究所 物質科学研究部長
"	安達 武雄	原研 東海研究所 環境科学研究部長
"	藤根 幸雄	原研 東海研究所 燃料サイクル安全工学部長
"	西堂 雅博	原研 東海研究所 放射線高度利用センター長
"	南波 秀樹	原研 高崎研究所 材料開発部長
"	棚瀬 正和	原研 高崎研究所 イオンビーム生物応用研究部長
幹 事	三好 慶典	原研 東海研究所 燃料サイクル安全工学部次長
"	篠原 伸夫	原研 東海研究所 物質科学研究部原子核研究G r主任研究員
"	久米 民和	原研 高崎研究所 イオンビーム生物応用研究部次長 兼生物機能研究室長
"	荒川 和夫	原研 高崎研究所 放射線高度利用センター ビーム技術開発室長
"	渡辺 博正	原研 企画室 研究協力推進室長

(2) 平成14年度 原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会  
放射線高度利用研究プロジェクト専門部会名簿

職名	氏名	所属および職位
部会長	河出 清	名古屋大学大学院 環境量子リサイクル研究センター長
委員	数土 幸夫	原研 高崎研究所長
"	橋本 昭司	原研 高崎研究所 材料開発部長
"	棚瀬 正和	原研 高崎研究所 イオンビーム生物応用研究部長
"	西堂 雅博	原研 高崎研究所 放射線高度利用センター長
"	渡辺 博正	原研 企画室 研究協力推進室長
専門委員	石井 魁造	東北大学大学院 工学系研究科量子エネルギー工学専攻 教授
"	伊藤 泰男	東京大学 原子力研究総合センター 東海分室 教授
"	今西 信嗣	京都大学大学院 工学研究科原子核工学専攻 教授
"	藏元 英一	九州大学 応用力学研究所プラズマ材料力学部門 教授
"	関村 直人	東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻 教授
"	中村 尚司	東北大学大学院 工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
"	森 敏	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
"	森田 健治	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
"	實川 資朗	原研 東海研究所 物質科学研究部 材料照射解析研究グループリーダー
"	笛本 宣雄	原研 東海研究所 中性子科学研究センター 施設安全グループリーダー
"	小原 祥裕	原研 高崎研究所 放射線高度利用センター 次長
幹事	小原 祥裕	原研 高崎研究所 放射線高度利用センター 次長
"	大坪 道朗	原研 高崎研究所 放射線高度利用センター 放射線照射業務課長

(3) 平成13年度 原研・大学プロジェクト共同研究検討委員会  
 バックエンド化学研究プロジェクト専門部会名簿

職名	氏名	所属および職位
部会長	岩本 昭	原研
委員	田中 知	東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻 教授
専門委員	工藤 久昭	新潟大学 理学部 助教授
"	木原 壮林	京都工芸繊維大学 工芸学部 教授
"	朽山 修	東北大学大学院 工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
"	葉袋 佳孝	武藏大学 人文学部 教授
"	海老原 充	東京都立大学大学院 理学研究科 教授
"	伊藤 泰男	東京大学 原子力研究総合センター 教授
"	辻 利秀	北陸先端科学技術大学院大学 材料科学研究所 教授
"	松井 恒雄	名古屋大学大学院 工学研究科量子工学専攻 教授
"	松本 史朗	埼玉大学 工学部応用化学科 教授
"	館盛 勝一	原研
"	安達 武雄	原研 東海研究所 環境科学研究部長 兼大気環境研究グループリーダー
"	吉田 善行	原研 東海研究所 物質科学研究所長
"	馬場 恒孝	原研 休職 (核燃料サイクル機構出向)
"	小川 弘道	原研 環境整備計画室調査役
"	中村 彰夫	原研 先端基礎研究センター 超ウラン化合物研究グループサブリーダー

注記：平成13年度末で散会

## 2. 大学側組織

## (1) 平成14年度 原研施設利用共同研究委員会名簿

職名	氏名	所属および職位
委員長	中澤 正治	東京大学大学院 工学系研究科 教授
委 員	海老原 充	東京都立大学大学院 理学研究科 教授
"	大矢 進	新潟大学 理学部 教授
"	小野興太郎	島根大学 総合理工学部 教授
"	川瀬 洋一	京都大学 原子炉実験所 教授
"	河出 清	名古屋大学 大学院環境量子リサイクルセンター長
"	柴田 徳思	高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター長
"	竹田満洲雄	東邦大学 理学部 教授
"	田中 知	東京大学大学院 工学系研究科 教授
"	中西 友子	東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
"	長谷川雅幸	東北大学 金属材料研究所 教授
"	藤井 保彦	東京大学 物性研究所 教授
"	渡辺 博正	原研 企画室 研究協力推進室長
"	小佐古敏莊	東京大学 原子力研究総合センター 助教授
"	柴田 裕美	東京大学 原子力研究総合センター 助教授
"	松崎 浩之	東京大学 原子力研究総合センター 助教授
"	伊藤 泰男	東京大学 原子力研究総合センター 教授
"	大日方鐵機	東京大学 原子力研究総合センター 事務長

(2) 平成14年度 原研施設利用共同研究委員会  
放射線高度利用プロジェクト共同研究専門委員会名簿

職名	氏名	所属および職位
委員長	河出 清	名古屋大学大学院 環境量子リサイクル研究センター長
委 員	関根 俊明	原研 イオンビーム生物応用研究部次長
"	中村 尚司	東北大学大学院 工学系研究科量子エネルギー工学専攻 教授
"	関村 直人	東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻 教授
"	森 敏	東京大学大学院 農学生命科学研究科応用生命化学専攻 教授
"	石井 慶造	東北大学大学院 工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
"	平山 英夫	高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター 教授
"	松崎 浩之	東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門 助教授
"	柴田 裕実	東京大学 原子力研究総合センター 重照射管理部門 助教授
"	伊藤 泰男	東京大学 原子力研究総合センター 全国共同研究部門 教授

(3) 平成13年度 原研施設利用共同研究委員会  
バックエンド化学プロジェクト共同研究専門委員会名簿

職名	氏名	所属および職位
委員長	田中 知	東京大学大学院 工学研究科システム量子工学専攻 教授
委 員	辻 利秀	北陸先端科学大学院大学 新素材センター 教授
"	葉袋 佳孝	武藏大学 人文学部 教授
"	稻垣八穂広	九州大学大学院 工学研究院エネルギー量子工学部門 助教授
"	篠原 伸夫	原研 東海研究所 物質科学研究部 主任研究員
"	海老原 充	東京都立大学大学院 理学研究科 教授
"	伊藤 泰男	東京大学 原子力研究総合センター 全国共同研究部門 教授

注記：平成13年度末で散会

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
上率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バース	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>3</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>		
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>		
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>		仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>		= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>		= 735.499W
1.60218 × 10 <sup>19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)



紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています