

核燃料サイクル公募型研究に関する
平成16年度研究概要報告

2005年6月

核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

2005年6月

核燃料サイクル公募型研究に関する平成16年度研究概要報告

報告者 テーマ一覧 参照
編集 技術展開部 技術協力課

要 旨

機構では、大学及び研究機関(以下「大学等」という。)との研究協力の推進を図るため、平成11年度から核燃料サイクル公募型研究推進制度を発足させ、平成16年度で6年目を迎えたが、本年度もって終了した。

同制度は、機構が取り組む核燃料サイクル分野の研究開発において、大学等の研究者から、広く先見的、独創的でかつ原則として機構の施設及び設備を利用する基礎・基盤的研究テーマを公募する。応募者には研究に主体的に取り組んで頂き、機構の研究者と外部の研究者との交流、情報交換、成果の公表等により、機構の研究環境の活性化を図り、もって基礎・基盤的研究開発を効率的に推進することを目的とする。

大学等の研究者から提案して頂いた研究テーマは、外部の専門家を中心とする選考委員会で選考している。

本報告書は、平成16年度に実施した高速増殖炉関係、核燃料サイクル関係、放射線安全関係及び地層処分・地層科学関係の核燃料サイクル公募型研究に関する4件の研究テーマの実施結果についてその概要をまとめたものである。

June 2005

Brief report of the JNC Cooperative Research (C) on the Nuclear Fuel Cycle
for 2004

Reported by: refer to the Theme Table

Edited by: Technical Cooperation Section, Technology Management Division

Abstract

The Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) started the JNC Cooperative Research Scheme (C) on the Nuclear Fuel Cycle in 1999 in order to promote research collaboration with universities and other research institutes (referred to as "universities, etc." below), which means that the fiscal year 2004 was the sixth year of the scheme and ended in 2004.

This scheme is to invite foresighted and original themes of basic and fundamental research, to be performed using JNC's facilities and equipment, in principle, for the research and development of JNC in the field of the nuclear fuel cycle, from researchers at universities, etc. Those researchers who propose research themes in response to the invitation are expected to lead the research. The purpose of the scheme is to promote the efficiency of basic and fundamental research and development by enhancing the research environment of JNC through collaboration between JNC's own researchers and other researchers, and exchange of information and publication of achievements, etc.

Research themes proposed by researchers at universities, etc. are screened by a screening committee consisting mainly of experts independent of JNC.

This report includes a summary of the results of the research carried out in fiscal year 2004 on four selected themes related to the JNC's collaborative research for fast breeder reactors, the nuclear fuel cycle, radiation safety and geological disposal/geoscience.

一 目 次 一

I	核燃料サイクル公募型研究に関する平成16年度研究テーマ一覧	iv
II	核燃料サイクル公募型研究に関する平成16年度研究概要報告	
1.	高速増殖炉関係	
(1)	流動弾性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と 早期寿命測定法の確率およびヘルカル管内に挿入された プローブ列からの振動ノイズの原因究明	1
2.	核燃料サイクル関係	
(2)	長寿命FPの中性子吸収断面積研究	14
3.	放射線安全関係	
(3)	放射線誘起表面活性効果を用いた放射線検出システムの開発	25
4.	地層処分・地層科学関係	
(4)	緩衝材およびその周辺岩盤の力学的安定基準の作成	38

I 核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度研究テーマ一覧

平成16年度核燃料サイクル公募型研究テーマ一覧

No.	研究テーマ	提 案 者 所属機関・氏名	機 構 側 研究担当者	研究 形態	研究期間
【高速増殖炉関係】					
1	流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立およびヘリカル管内に挿入されたプローブ列からの振動ノイズの原因究明	九州大学 大学院工学系研究科 機械科学部門 教授 村上 敬宜	敦賀 国際センター I S I Gr 上田 雅司	共同 研究	平成14年度 ～ 平成16年度
【核燃料サイクル関係】					
2	長寿命F Pの中性子吸収断面積研究	東京工業大学 原子炉工学研究所 助教授 井頭 政之	東海 環境センター 先進リサイクル部 システムGr 中村 詔司	共同 研究	平成13年度 ～ 平成16年度
【放射線安全関係】					
3	放射線誘起表面活性効果を用いた放射線検出システムの開発	東京海洋大学 海洋工学部 海洋電子機械工学科 教授 賞雅 寛而	東海 放射線安全部 線量計測課 辻村 憲雄 吉田 忠義	共同 研究	平成14年度 ～ 平成16年度
【地層処分・地層科学関係】					
4	緩衝材およびその周辺岩盤の力学的安定基準の作成	京都大学 大学院農学研究科 地域環境科学専攻 助教授 小林 晃	東海 環境センター 処分研究部 処分パリアGr 藤田 朝雄, 川上 進	共同 研究	平成14年度 ～ 平成16年度

II 核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度研究概要報告

1. 高速増殖炉関係

核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度概要報告書

研究テーマ	流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立およびヘリカル管内に挿入されたプローブ列からの振動ノイズの原因究明		
研究者所属、氏名			
大学側	九州大学 大学院工学研究院 機械科学部門 教授 村上敬宜 知能機械システム部門 教授 末岡淳男, 助教授 井上卓見 佐世保高専 助手 小田原悟		
機構側	敦賀本部 国際技術センター ISI システム開発 Gr. 副主任研究員 上田 雅司		
研究実施場所	核燃料サイクル開発機構 敦賀本部 国際技術センター 研究棟 および九州大学機械科学部門・知能機械システム部門、佐世保高専		
通算研究期間	平成 14 年 9 月 ~ 平成 17 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 16 年 8 月 ~ 平成 17 年 3 月
研究形態	<input checked="" type="checkbox"/> 共同研究	<input type="checkbox"/> 委託研究	<input type="checkbox"/> その他 ()

【研究目的】

「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故や首都高速案内標識柱落下事故は、周囲の流体に励起されて起こる自励振動、すなわち流力弹性振動を受けて疲労破壊に至ったことが原因である。しかしながら、流力弹性振動による疲労破壊の問題は材料力学、流体力学および振動工学の学際領域の問題であり、In-line 振動の抑制について機械学会の設計指針が設定されているものの、In-line 振動に起因した超長寿命疲労破壊機構についての系統的な研究はこれまで世界的にも行われていない。そこで、本研究は流力弹性振動、特に In-line 振動による疲労破壊のメカニズムを解明し、繰返し数 $10^8 \sim 10^9$ 回の超長寿命疲労破壊のメカニズムを究明するとともに、初期段階のひずみデータを用いて疲労寿命を予測する方法を提案することを目的とする。

また、「もんじゅ」の蒸気発生器伝熱管の体積検査に用いる渦電流探傷試験装置において、窒素ガスの圧力によりセンサー・プローブを伝熱管内に挿入する圧送過程で、流体力および摩擦に起因すると思われるプローブの振動とそれに原因するセンサーのノイズ信号が発生し、微少な欠陥を検出する上で問題となっている。そこで、本研究においてノイズの発生メカニズムを流体力学的および振動工学的に解明し、振動とノイズ信号との関係を明らかにするとともに、ノイズに強いプローブに関する提案を行うことを目的とする。

【研究内容（概要）】

テーマ A：流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立

- ・ In-line 振動による疲労破壊を再現できるような水流動循環実験装置を完成させる。
- ・ 円柱の振動解析を行い、最適実験条件を決定する。
- ・ 試験円柱の振動特性を調査する。
- ・ 初期段階のデータのみを用いて破壊までの疲労寿命を予測する方法を確立する。
- ・ 漏放出周波数の変化を、熱線を用いた後流の速度変動測定により調査する。スパン方向励起モードによる渦構造の空間的な変化を後流速度変動の時空間相関により測定する。
- ・ 加速度ピックアップを用いて、き裂の進展に伴う固有振動数や振動特性の時間的変化をウェーブレット変換によってとらえ、クラックの早期発見を図る。
- ・ AFM などを用いて、破壊起点となる材料内部の介在物および不均質組織の様子を観察し、In-line 振動による繰返し数 10^8 を超える超長寿命疲労破壊機構を解明する。

テーマ B：ヘリカル管内に挿入されたプローブ列からの振動ノイズの原因究明

- ・ モックアップを使用した実験において、センサー部の前に先導ケーブルを設置して、センサー部での摩擦振動を抑制する対策を実験で確かめる。先導ケーブルの長さ、フロートと管壁との摩擦係数の大小による摩擦振動の相違、先導ケーブルの曲げ剛性の影響、先導ケーブルのフロート径の影響、ケーブルの長手方向振動と管内半径方向の振動のセンサーノイズへの影響の相違、ヘリカル管の半径が小さいほどノイズが大きいかどうかなどを検討する。
- ・ 摩擦振動に関わる流体搬送力の役割を詳細に検討するとともに、流体搬送力／摩擦力／押力・引張力／重力の動的なつり合い／ケーブルの長手方向減衰効果／ヘリカル管の半径の影響／遠心力・コリオリ力を考慮した運動方程式を導出する。
- ・ モックアップを使用した実験の重要な結果を、パソコンを利用したシミュレーションと比較する。極めて多くの自由度を有するケーブルの摩擦振動を解析するための問題点を解決し、我々の開発した伝達影響係数法という高速・高精度な振動解析手法を適用する。
- ・ 受動的な振動制振対策を検討する。たとえば、先導ケーブルを動吸振器とするアイデアを実現するための振動学的な検討と衝撃ダンパーの設置法などを検討対象とする。

【使用主要施設】

テーマ A に関しては佐世保高専の設備を利用した。当該研究費による装置製作による実験装置を用いて In-line 流体振動実験を行い、In-line 振動の再現とそれによる振動系構成部品の疲労破壊を実験的に再現した。

テーマ B に関しては、核燃料サイクル機構敦賀本部のモックアップ装置を利用した実験を行い、プローブ列の摩擦振動の本質を明らかにする実験を核燃料サイクル機構の協力によって行った。核燃料サイクル機構はそれ以外に多くの実験を前もって行い、重要なパラメータの影響の考察を行うとともに、我々に対して追加実験をも実施していただいた。テーマ B に関する実験結果を再現し、RF 信号ノイズ低減の方策を見るために、パソコンによる振動解析のプログラム作成を行った。

【進捗状況（当該年度までの概要）】

テーマ A：流力弾性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立

平成 14 年度は In-line 振動による疲労破壊を起こすための水流動循環実験装置を設計・製作し、実験装置を稼働することができた。さらに、温度計をモデルとした S45C 製試験円柱を水流動循環実験装置に固定して In-line 振動による疲労破壊を実験室的に再現することに成功した。

平成 15 年度は In-line 振動とカルマン渦による渦励振振動との疲労破壊現象の相異について検討し、In-line 振動の疲労破壊現象から見た特徴を明らかにした。また、き裂が発生していない段階での初期データ、すなわち初期ひずみデータのみによって破壊に至るまでの疲労寿命を予測する方法を提案した。

平成 16 年度は In-line 振動による疲労破壊過程、とくにクラックを早期発見する目的でウェーブレット変換を用いた実験を実施し、ウェーブレット解析では、クラック長さが 1mm 程度でその存在を見抜くことがわかり、簡易なクラック判定法として利用できることを明らかにした。

テーマ B：ヘリカル管内に挿入されたプローブ列からの振動ノイズの原因究明

平成 14 年度は核燃料サイクル機構に設置されているモックアップによるプローブ列の摩擦振動実験を行い、摩擦振動の多くの特徴を把握した。とくに、炭素鋼(STBA24)製蒸発管モックアップの上段、中間および下段の 3 力所に透明アクリル管を設置して、プローブ列の摩擦振動挙動を直接カメラで観察することにした。このモックアップの改良によって摩擦振動の挙動が鮮明となり、今後の解析および大学における基礎実験の見通しが付いた。

しかし、プローブの摩擦振動の一部分だけの観測であるため、ケーブル挿入および引戻時の全行程にわたる振動挙動を知ることができなかつた。

平成 15 年度はモックアップを用いて、プローブのセンサー部に加速度ピックアップおよび張力センサーを取り付けてプローブの挿入時および引戻し時の全過程を通じたプローブの振動と RF 信号ノイズの関係を明らかにした。

平成 16 年度はモックアップを用いて、先導ケーブルへの対策、動吸振器による対策を検討し、その実験結果を再現するために伝達影響係数法を適用した数値シミュレーションを行い、数値計算結果の精度向上を図った。

【研究成果（当該年度）】

テーマ A：流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立

平成 14、15 年度の研究成果では、水流動循環実験装置を製作し In-line 流力弹性振動による疲労破壊を再現することに成功した。また、き裂が発生していない段階での初期ひずみデータのみによって破壊に至るまでの疲労寿命を予測する方法を提案した。

今年度は、In-line 流力弹性振動している円柱試験片の加速度波形に注目し、その加速度波形に内在する疲労き裂の開閉口に伴う異常信号をウェーブレット変換により検出し、疲労き裂を早期に発見する方法を提案した。

1. ウェーブレット変換(ハーモニックウェーブレット)

ウェーブレット変換 (WT) は、時間周波数解析を可能とする特徴を持ち、機械要素の異常検出法としての利用可能性が研究されている。本研究では、ハーモニックウェーブレット (HWT) を用いて WT を行う。HWT のマザー・ウェーブレットを次式に示す。

ここで $\psi(2^j t)$ とおけば、このウェーブレットが完全に分離された周波数成分をもつようになる。また、 $\psi(2^j t)$ は基底関数となり、任意の信号波形 $f(t)$ を以下のように表せる。

ここに, $a_{j,k}$ はウェーブレット係数, cc は右辺の総和に含まれる各要素の複素共役である。式(2)において k に関する総和を $g_j(t)$ とおくと, 対象とする信号は, $f(t) = g_0(t) + g_1(t) + \dots$ と分解できる。本研究では、この $g_j(t)$ を表示してその振幅変化から異常信号を確認する。

HWT の実行時の HWT に生じる偽の波 (End effects) は、信号波形中に含まれる微小な異常信号を検出する際の妨げとなる。この End effects は、解析対象波形の始点から終点までの不連続性が主たる原因であり、フーリエ変換のギブス現象に相当する。そこで、始点から終点までが主要な振動周期の整数倍となる定常波形を解析対象とした。また、信号波形に含まれるノイズも微小な異常信号の検出を難しくする。そこで、解析対象である主要振動周期の整数倍の定常波形を、計測された振動波形から複数個取出し、それぞれの波形から求めたフーリエ係数を平均化することによりノイズの低減を図り、HWT を実行した。

2. In-line 流力弹性振動によって発生する疲労き裂の検出実験

図1に示す実験装置を用いて、円柱試験片にIn-line流力弹性振動を起こさせ、疲労き裂を発生させた。前述したHWTにより、In-line流力弹性振動している試験片の加速度波形から、この疲労き裂を起因とした異常信号を早期に検出できるかをテーマに実験を行った。

まず、実験で得られた加速度振動波形データの FFT 分析から求めた、試験片の水中での振動数変化によれば、実験開始後 44 分あたりから、き裂進展にともない、振動数が変化している様子がわかった。そこで、この加速度振動波形データに対して、HWT を適用し、き裂から発生する微小な異常信号を検出する。HWT の結果を見ると、実験開始後 0 分から 44 分の結果からは明らかな異常信号は見られなかった。しかし、実験開始後 48 分において微小な異常信号を示す周期的なピークが 1 周期あたり 1 つ見られた。この異常信号を示すピークは、時間経過とともに大きくなり、図 2 に示すように実験開始後 68 分では明確に現れた。なお、図 2 の上図はノイズを低減させた加速度振動データ $f(t)$ であり、下図は $g_7(t)$ （周波数範囲約 2500~5000Hz）である。この周期的な異常信号の加速度波形上での出現位置が、開口していたき裂が閉口すると考えられる位置にあることから、異常信号はき裂閉口時の衝突から発生していると判断される。

この実験から、本研究で提案した HWT を用いれば、In-line 流力弹性振動によって発生する疲労き裂を、試験片の水中での固有振動数が変化するのとほぼ同時に、検出できることがわかった。また、過去の実験結果を参考にすれば、異常信号を示すピークが現れ始めた実験開始後 44 分でのき裂寸法が 1.8mm 以下であることがわかった。

テーマ B: ヘリカル伝熱管内に挿入されたプローブ列からの振動ノイズの原因究明

平成 14, 15 年度の研究成果では、モックアップ実験装置を使用してプローブの挿入時および引戻し時のプローブの全過程にわたる振動挙動を明らかにして、摩擦振動の特徴の多くを把握した。

今年度は、プローブのケーブルの太さやフロートピッチの変更があったため、全体の振動挙動の影響を確認した。また、流体搬送力やプローブの搬送速度の振動および RF 信号ノイズへの影響を確認した。さらに、先導ケーブルを利用した振動抑制対策を行い、ノイズを低減して十分な探傷精度が得られることを確認した。

1. 挿入・引戻し実験

図 3, 図 4 にプローブを最小ヘリカル直径 1.2m の伝熱管に基準条件（先導ケーブル長さ 2.5m, 流量 $63\text{m}^3/\text{h}$, 搬送速度 200mm/s）で挿入および引戻しを行い、RF 信号と振動加速度を測定した結果を示す。実験からプローブの振動およびノイズは引戻し時よりも挿入時のほうが大きいこと、プローブの挿入時および引戻し過程で加速度振動を周波数分析すると、挿入距離が一定量を超えると振動が激しくなる付近で約 20Hz のピークが現れること、引戻し時はこのようなピークは現れないことが確認された。これらの振動特性はプローブが変更される前と同じ傾向を示していた。新しいプローブに変更されたことによる振動挙動の違いは、軸方向と径方向の振動のピークの連成が以前より弱くなったことがあげられる。これらの振動挙動の特徴をもとに数値シミュレーションのためのモデル化を行った。

2. プローブ搬送条件と振動および RF 信号ノイズの影響

プローブをヘリカル伝熱管最下部まで挿入して、搬送速度を 0 にして圧縮空気だけを吹流し流体力のみで振動が発生するか確認した。図 5 はその結果である。この実験からプローブの振動は流体力のみで発生しないことが確認され、プローブと伝熱管との間の摩擦力が振動を発生させていると推察された。次に伝熱管のヘリカル直径の違いによる RF 信号ノイズおよび振動の関係を調べた。図 6 はヘリカル直径が最大の伝熱管に挿入したときの結果である。ヘリカル直径が最小の伝熱管に挿入した図 1 の結果と比較すると、RF 信号ノイズおよび振動がともに小さくなっていることが確認された。この実験からヘリカル直径が大きくなると振動やノイズが小さくなることが確認された。次にプローブの搬送速度の違いによる S/N 比と振動の影響を調べる実験を行なった。図 7 はその結果である。実験から搬送速度が速くなると振動が大きくなり、それに伴い、S/N 比が小さくなることがわかった。

3. RF 信号ノイズ低減対策

プローブの挿入過程で、センサー部がヘリカル管の最下部を通過中のセンサー付近と先頭から 30m 手前のプローブの振動軌跡を高速度カメラで測定した。その結果、プローブは先頭に近いセンサー部付近の振幅のほうが大きいことがわかった。そこでセンサー部の先に付けられた先導ケーブルの長さを長くしてセンサーを先頭から離す対策をおこなった。そのときの RF 信号と加速度振幅の関係を図 8 に示す。実験ではさらに先導ケーブルのバタツキを小さくするため、先導ケーブルの曲げ剛性を低くしたり、先導ケーブルのフロート直径を大きくして先頭部の流体抗力による引張力を大きくした。これらの対策を施すことでセンサー部の径方向振動が低減され、S/N 比が向上して十分な探傷精度が得られることが確認された。一方、軸方向の振動はあまり低減されなかった。この結果から RF 信号のノイズは軸方向振動よりも径方向の振動の寄与が大きいことがわかった。今後の課題として、軸方向振動を低減し、更なる探傷効率の向上を図る必要がある。

4. 解析モデルと数値計算

実験から観測されたプローブの振動が、プローブに取り付けられたフロートと蒸気発生器伝熱管との間のクーロン摩擦に起因するものと仮定し、解析モデルを構築した。解析を容易

にするため、以下の前提でモデル化を行った。

(a) ヘリカル管の高さ方向の変化は無視した。プローブは同一平面にある円管内を移動すると仮定し、この平面内でのプローブの運動・振動のみを取扱う。

(b) プローブを、図9に示すように質量と慣性モーメントを持つ集中剛体要素が質量のないはり要素でつながれた質量集中系としてモデル化した。各剛体要素を節点(Node)と呼び、節点 j と $j-1$ 間のはり要素を j 番めはり要素(j -th beam element)と呼ぶ。フロートに相当する集中剛体要素では、フロートと同径の質量のない仮想球(Virtual sphere)を想定し、この球が流体による搬送力を受け、伝熱管内壁に接触すると考える。

(c) 挿入時のプローブには張力が作用するため、フロートと伝熱管との接触はヘリカル管の内径側のみで生じる。

(d) プローブ長さは一定として計算を行う。様々な長さ(各長さは一定)のプローブを対象とした計算を行い、プローブ長さの変化に対応する。

(e) 引戻し時は振動、ノイズともに小さいため、挿入時のみを対象とする。

図10に、 j 番めはり要素両端の変位、角変位と、作用する力、モーメントの正方向を示す。 $x_j(t), y_j(t)$ は節点 j のプローブ軸方向変位、ヘリカル半径方向変位、 θ_j は節点 j の重心まわりの角変位である。また、 $\bar{V}_j(t), V_{j-1}(t)$ は軸力、 $\bar{F}_j(t), F_{j-1}(t)$ はせん断力、 $\bar{N}_j(t), N_{j-1}(t)$ はモーメントであり、変位ベクトルや力ベクトルを以下のように定義する。左肩号「 t 」は転置記号である。

$d_{j-1}(t)=^t(x(t), y(t), \theta(t))_{j-1}$, $d_j(t)=^t(x(t), y(t), \theta(t))_j$, $f_{j-1}(t)=^t(V(t), F(t), N(t))_{j-1}$, $\bar{f}_j(t)=^t(\bar{V}(t), \bar{F}(t), \bar{N}(t))_j$ (3)
はり要素の剛性がケーブルの剛性に相当する。これに加え、ケーブルには大きな減衰効果があるので、はり要素両端の速度ベクトル $\dot{d}_j(t)$ および $\dot{d}_{j-1}(t)$ に関連する減衰力も考慮する。ここでは、はり要素の剛性行列に比例する比例粘性減衰行列(比例係数 δ)を設定して減衰効果を表す。はり要素をオイラばりとすれば、両端の状態量ベクトルの間の関係は、

$$\begin{bmatrix} f_{j-1}(t) \\ \bar{f}_j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_j F_j^{-1} L_j & L_j F_j^{-1} \\ -F_j^{-1} L_j & F_j^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{j-1}(t) \\ d_j(t) \end{bmatrix} + \delta \begin{bmatrix} -L_j F_j^{-1} L_j & L_j F_j^{-1} \\ -F_j^{-1} L_j & F_j^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_{j-1}(t) \\ \dot{d}_j(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、

$$L_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & l_j & 1 \end{bmatrix}, \quad F_j = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & \gamma \\ 0 & \gamma & \beta \end{bmatrix}, \quad (\alpha_x, \alpha_y, \beta, \gamma)_j = \left(\frac{l}{EA}, \frac{l^3}{3EI}, \frac{l}{EI}, \frac{l^2}{2EI} \right)_j \quad (5)$$

l_j , $(EA)_j$ および $(EI)_j$ は、それぞれ j 番めはり要素の長さ、引張り剛性および曲げ剛性、 F_j は、はり要素を片持ちはりとみなしたときの静的影響係数行列である。軸力によって発生するモーメントは、 $\bar{N}_{V,j}(t) = \bar{V}_j(t)[y_j(t) - y_{j-1}(t)] \approx \bar{V}_j(t)y_j\theta_j(t)$ と近似し、節点 j にはばね定数 $\bar{V}_j(t)l_j$ の回転ばねをおいて表す。

節点 j の集中剛体要素に作用するプローブ挿入時の主な力、モーメントを図11に示す。節点 j はフロート位置に相当し、仮想球(フロート)とそれに作用する力も示す。 D_j は、圧縮空気によってフロートに作用する搬送力であり、次式で表されるとする。

$$D_j = c_D (1/2) \rho_f (A_f - A_c) v_{rel}(\dot{x}_j) |v_{rel}(\dot{x}_j)| \quad (6)$$

$$v_{rel}(\dot{x}_j) = Q/(a - A_c) - u - \dot{x}_j(t), \quad c_D = 0.44 : \text{抗力係数}, \quad \rho_f : \text{流体密度}$$

$$A_f = \pi d_f^2 / 4 : \text{フロート断面積}, \quad A_c = \pi d_c^2 / 4 : \text{ケーブル断面積}$$

$$a = \pi d_{in}^2 / 4 : \text{伝熱管断面積}, \quad d_{in} : \text{伝熱管内径}, \quad Q : \text{空気流量}$$

フロートと伝熱管内壁は、 $y_j(t) < 0$ のとき、ばね定数 \hat{k} の接触ばねで接するので、垂直抗力 $S_j = -\hat{k}y_j(t)$ とクーロン摩擦力 $R_j = \mu_d S_j$ (μ_d :動摩擦係数)がフロートに作用する。その他の図11に示す力と、集中剛体要素がヘリカル管に沿って円運動することによる慣性力を考慮すると、節点 j の集中剛体要素の運動方程式は次式となる。ここに、 $1+y_j(t)/r \approx 1$ と近似している。

$$M \ddot{d}_j(t) + C_j(\dot{x}_j) \dot{d}_j(t) + K_j(y_j, \dot{x}_j, \dot{\theta}_j, \bar{V}_j) d_j(t) = \tilde{q}_j(\dot{x}_j) + f_j(t) - \bar{f}_j(t) \quad (7)$$

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ -J/r & 0 & J \end{bmatrix}, \quad C_j(\dot{x}_j) = \begin{bmatrix} 0 & 2m\omega_j(\dot{x}_j) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad K_j(y_j, \dot{x}_j, \dot{\theta}_j, \bar{V}_j) = \begin{bmatrix} 0 & -\mu_j(\dot{x}_j, \dot{\theta}_j)k_j(y_j) & 0 \\ 0 & k_j(y_j) & 0 \\ 0 & -\mu_j(\dot{x}_j, \dot{\theta}_j)k_j(y_j)d_f/2 & \bar{V}_j(t)l_j \end{bmatrix}$$

$$k_j(y_j) = \begin{cases} 0 & : y_j(t) \geq 0 \\ \hat{k} & : y_j(t) < 0 \end{cases}, \quad \mu_j(\dot{x}_j, \dot{\theta}_j) = \begin{cases} \mu_d & : u + \dot{x}_j(t) + \dot{\theta}_j(t)d_f/2 \geq 0 \\ -\mu_d & : u + \dot{x}_j(t) + \dot{\theta}_j(t)d_f/2 < 0 \end{cases}, \quad \tilde{q}_j(\dot{x}_j) = [D_j, mr\omega_j^2(\dot{x}_j), 0]$$

フロートに相当しない集中剛体要素には、圧縮空気による搬送力が作用せず、伝熱管内壁との接触も生じないので、式(7)において D_j , \hat{k} および μ_d を 0 にすればよい。

式(7)に逐次積分法を適用し、全ての節点についてはり要素の式(4)と連立して解けば、時間ステップ Δt ごとの応答が求められる。ここでは逐次積分法として Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$)、系全体の応答解析法として当研究室で開発した伝達影響係数法を用いた。

表 1 に数値計算のパラメータを示す。4 種類の搬送ケーブル長さ $l = 15, 30, 45, 60$ m について数値計算を行い、挿入長さの変化に対応した。センサー位置に相当する節点の振動変位を図 12 に示す。図 12(a)は軸方向変位 $x_j(t)$ 、図 12(b)は半径方向変位 $y_j(t)$ である。搬送ケーブル長さ 30 m と 45 m の間で振動が急に大きくなっている、ヘリカル管の中央部付近を越える辺りで振動が大きくなるという実験結果に対応している。

ヘリカル管直径のみを表 1 の 1.2 m から 2.5 m に変更し、最も振動する $l = 60$ m の結果を図 13 に示す。実験結果と同様、プローブ軸方向、半径方向ともに振動が小さくなっている。

プローブは搬送せず、圧縮空気のみ流す吹流し実験に相当するものとして、表 1 のパラメータから搬送速度のみ $u = 0$ mm/s として数値計算を行った。 $l = 60$ m で、センサー位置の節点の変位を図 14 に示す。軸方向、半径方向変位とともに、過渡状態を経た後、振動することなく一定値に収まった。これも実験と同様の結果である。

先導ケーブルを長くするとともに、曲げ剛性を低くし、その部分のフロート直径を大きくする対策に関しては、先導ケーブル長さを 10 m、曲げ剛性を表 1 の半分にし、先導ケーブルのフロート径のみ 20 mm と大きくした。 $l = 60$ m の結果を図 15 に示す。軸方向変位は図 12(a)と大差ないが、半径方向変位が図 12(b)と比較して大きく減少しており、実験結果を再現できている。

以上のように、数値シミュレーションによって得られた結果は、モックアップ実験装置から得られた結果と非常に一致を示した。したがって、これをツールとしてさらに良いプローブ列の設計を行うことができる。

【成果の反映状況】

本研究で得られた研究成果は、もんじゅ運転再開に向けて、大規模システムの接合部に起因する事故の安全性確保および共用期間中の蒸気発生器伝熱管の探傷検査精度向上に反映されている。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

テーマ A に対して、

1. 小田原悟, 村上敬宜, 井上雅弘, 末岡淳男
In-Line 流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立
日本機械学会材料力学部門講演会発表 2003.9 (富山)
2. 金元啓幸, 井上卓見, 末岡淳男
ウェーブレット変換による定常振動波形の異常性検出（実験的検証）,
日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集, 2003.9 (長崎)
3. Hiroyuki KANEMOTO, Takumi INOUE, Atsuo SUEOKA
Detection of an Abnormality in Steady State Vibrations by Wavelet Transforms
(Experimental Study)
Proc. of the Asia-Pacific Vibration Conference 2003, Vol.1, pp.236-241, November, 2003.
4. 小田原悟, 村上敬宜, 井上雅弘, 末岡淳男
In-line 流力弹性振動による配管系の疲労破壊現象の解明と早期寿命予測法の確立
日本機械学会論文集 (A 編), 70 卷 690 号, pp.212-220, (2004 年 2 月)
5. Satoru ODAHARA, Yukitaka MURAKAMI, Masahiro INOUE, Atsuo SUEOKA
Fatigue Fracture by Flow-Induced Vibration
(Effect of Initial Defect Size on Cumulative Fatigue Damage)
JSME International Journal, Series A, Vol.47, No.3, pp.426-437, (2004 年 7 月)
6. 金元啓幸, 井上卓見, 小田原悟, 末岡淳男, 村上敬宜
In-Line 流力弹性振動によって発生する疲労き裂のウェーブレット変換による検出
日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2004.9 (東京)
7. 金元啓幸, 井上卓見, 小田原悟, 末岡淳男, 村上敬宜
ウェーブレット解析を用いた In-Line 流力弹性振動によって発生する疲労き裂の検出
日本機械学会流体工学部門・講演会, 2004.11 (北九州)
8. 井上卓見, 金元啓幸, 末岡淳男, 小田原悟, 村上敬宜
ハーモニックウェーブレットによる定常振動波形の異常性検出
日本機械学会論文集, (投稿中) (2004.12)
9. Satoru ODAHARA, Yukitaka MURAKAMI, Masahiro INOUE, Atsuo SUEOKA
Fatigue Fracture by In-line Flow-induced Vibration and Fatigue Life Evaluation
JSME International Journal, Series A, (掲載決定)

テーマ B に対して、

1. 井上卓見, 末岡淳男
軸力を考慮した伝達影響係数法による自由振動解析
日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2003.9 (長崎)
2. 中野寛, 井上卓見, 末岡淳男, 村上敬宜
原子力発電所蒸発管内探傷ケーブルに発生する摩擦振動(モックアップによる実験結果),
日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2004.9 (東京)
3. 井上卓見, 末岡淳男, 中野寛
原子力発電所蒸発管内探傷ケーブルに発生する摩擦振動(数値シミュレーション),
日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2004.9 (東京)
4. 末岡淳男, 井上卓見, 中野寛, 金元啓幸, 今井義之, 山口智彦, 大村和久, 村上敬宜
高速増殖炉ヘリカル伝熱管探傷プローブの振動によるセンサノイズとその対策
(第 1 報, モックアップによる実験)
日本機械学会論文集, (投稿中) (2005.4)
5. 井上卓見, 末岡淳男, 前原猛, 中野寛, 金元啓幸, 村上敬宜
高速増殖炉ヘリカル伝熱管探傷プローブの振動によるセンサノイズとその対策
(第 2 報, 数値シミュレーション結果)
日本機械学会論文集, (投稿中) (2005.4)

別紙資料（図、表）

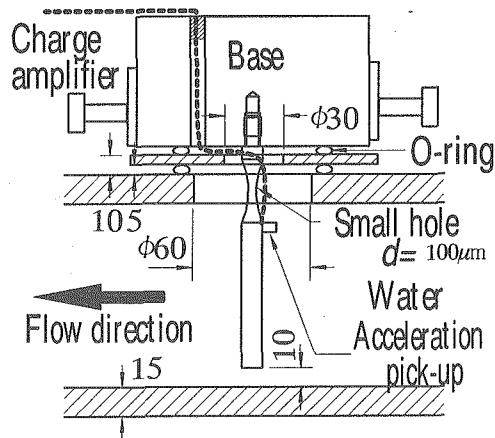


図1 実験装置（試験部詳細図）

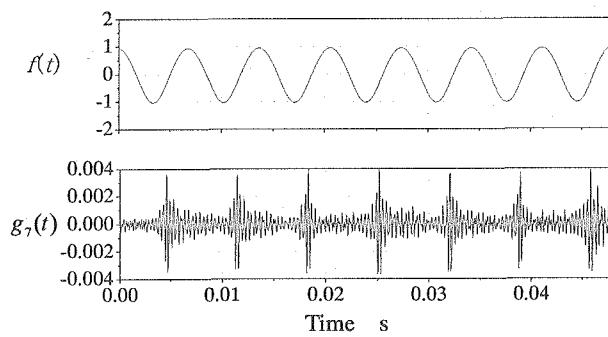


図2 実験開始後 68 分の HWT 結果

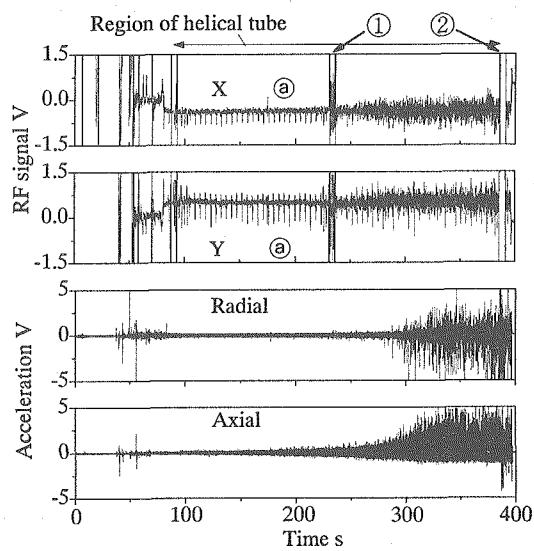


図3 挿入時の RF 信号および加速度振動波形

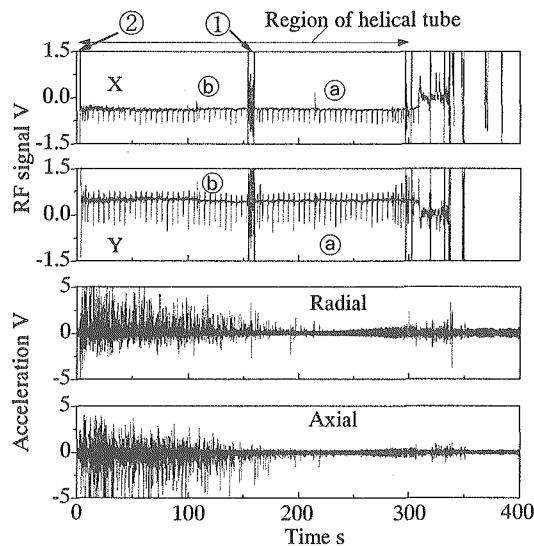


図 4 引戻し時の RF 信号および加速度振動波形

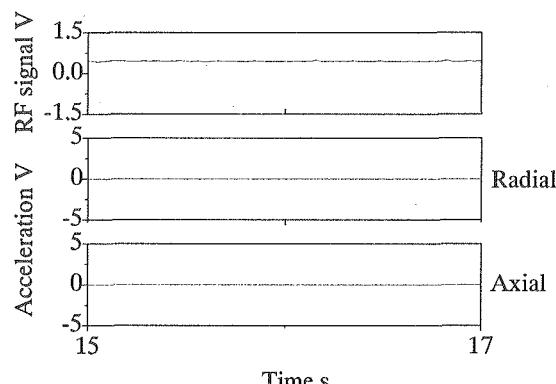


図 5 吹流し実験結果

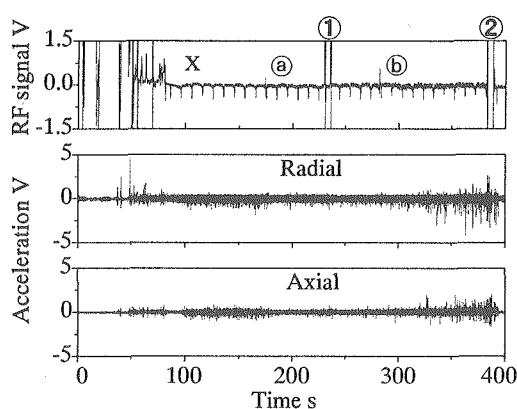


図 6 挿入時の RF 信号と加速度振動波形(ヘリカル直径 2.5m)

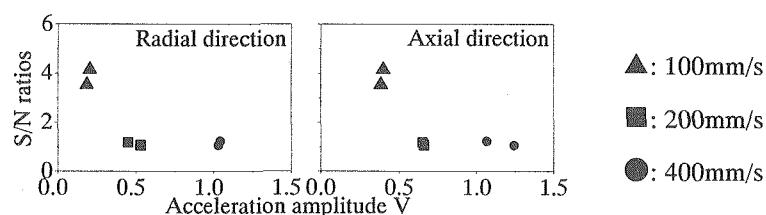


図 7 搬送速度と S/N 比と加速度振幅の関係

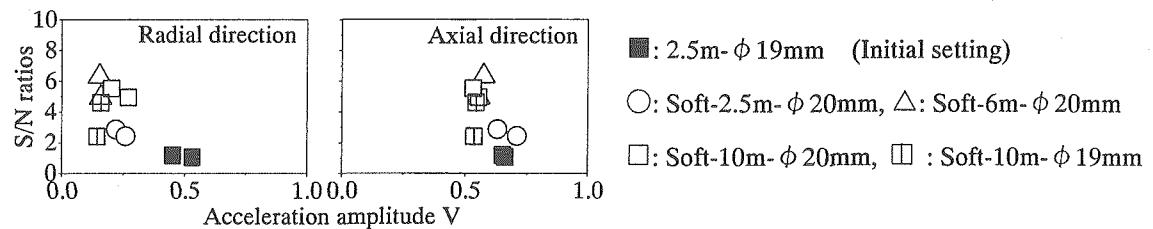


図 8 先導ケーブル長さ、曲げ剛性の違いによる RF 信号ノイズと加速度振幅の関係

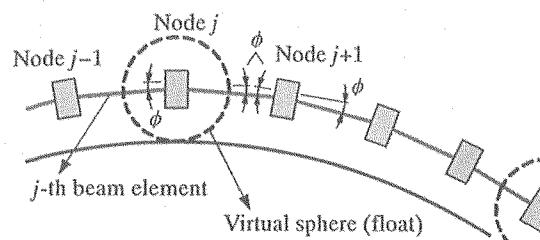
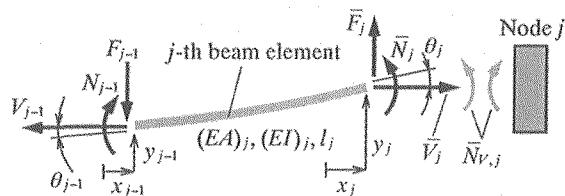
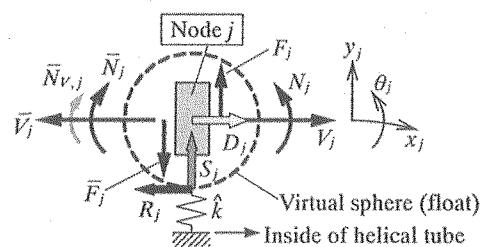


図 9 プローブのモデル化（質量集中系）

図 10 j 番めはり要素両端の物理量図 11 節点 j での状態量および作用する外力

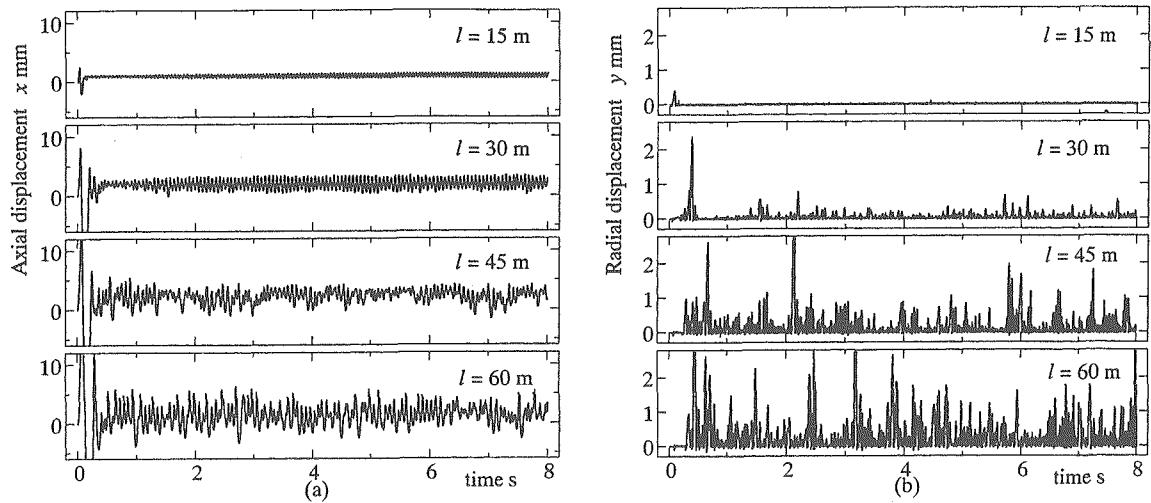
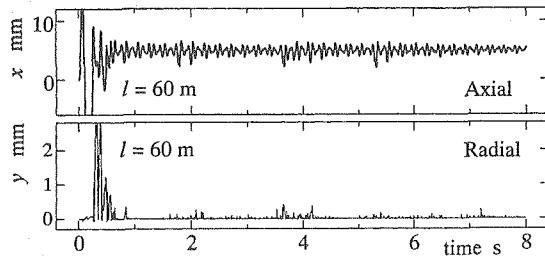


図 12 プローブ振動の数値計算結果

表 1. 数値計算のパラメータ

d_h	Diameter of helical tube	1.2 m
d_{in}	Inner diameter of heating tube	24.2 mm
u	Feed speed of probe	200 mm/s
ρ_f	Air-flow density	1.023 kg/m ³
Q	Supply rate of air-flow	63.0 m ³ /h
d_c	Diameter of cable	8.35 mm
l	Length of carrier cable	15, 30, 45, 60 m
l_G	Length of guide cable	2.5 m
ρ_p	Density of probe	0.111 kg/m
(EA)	Tensile rigidity of cable	1.1×10^5 N
(EI)	Flexural rigidity of cable	4.8×10^{-2} Nm ²
d_f	Diameter of float	19.0 mm
p_f	Float pitch	100 mm
k	Contact rigidity between float and tube	10^5 N/m
μ	Coefficient of kinetic friction	0.15
δ	Coefficient of proportional viscous damping	5.0×10^{-5} s

図 13 ヘリカル径 2.5 m, $l = 60$ m

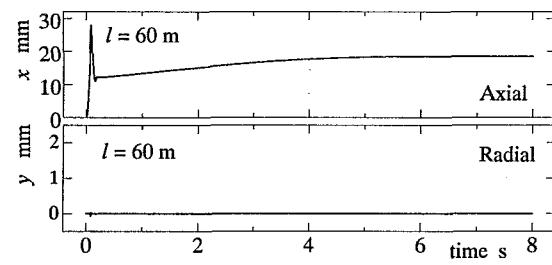


図 14 挿入速度 = 0, $l = 60$ m

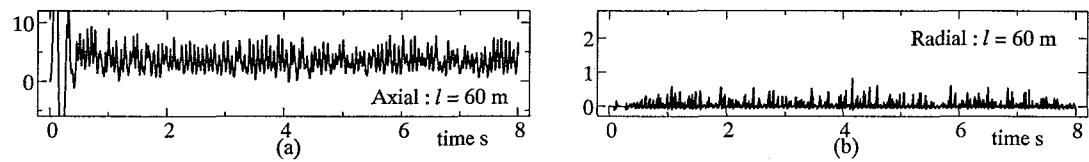


図 15 先導ケーブル変更(長さ 10 m, 曲げ剛性 1/2, フロート径 20 mm), $l = 60$ m

II 核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度研究概要報告

2. 核 燃 料 サ イ ク ル 関 係

核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度概要報告書

研究テーマ	長寿命FPの中性子吸収断面積研究					
研究者所属、氏名						
大学側	東京工業大学 原子炉工学研究所：助教授 井頭 政之、助手 大崎 敏郎 大阪大学 核物理研究センター：教授 永井 泰樹 京都大学 原子炉実験所：教授 山名 元、助手 藤井 俊行、助手 高宮 幸一					
機構側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル部 システム設計グループ-プリーダ- 原田 秀郎、チ-ムリ-ダ- 古高 和禎、チ-ムリ-ダ- 中村 詔司					
研究実施場所	東京工業大学 原子炉工学研究所、京都大学 原子炉実験所、 米国オークリッジ国立研究所(ORNL)、機構 東海事業所 乾式プロセス・材料試験棟					
通算研究期間	平成 13 年 8 月 ~ 平成 17 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 16 年 8 月 ~ 平成 17 年 3 月			
研究形態	<input checked="" type="checkbox"/> 共同研究 <input type="checkbox"/> 委託研究 <input type="checkbox"/> その他 ()					
【研究目的】						
核燃料サイクル開発機構等の推進する核変換技術開発を進めるにあたり、長寿命の核分裂生成物(LLFP)の核変換・短寿命化を引き起こす中性子捕獲反応の精度の良い断面積データが必要である。しかし、放射性核種の高速(keV 領域)中性子捕獲反応の測定は難しいため測定データが非常に少なく、また理論計算による断面積予測の精度も悪いため、現在の核データ・ライブラリに格納されている LLFP の高速中性子捕獲反応断面積の精度は悪い。従って、本研究では、重要な LLFP の高速中性子捕獲断面積を誤差 10%以内(目標 5%)の精度で測定することを目的とする。						
【研究内容(概要)】						
平成 13~16 年度の期間(当初は平成 13~15 年度の計画であったが、keV 中性子捕獲断面積測定実験に用いる ORNL 所有中性子源 ORELA の不調等のために期間を 1 年間延長)、本研究において、LLFP(⁷⁹ Se, ⁹³ Zr, ⁹⁹ Tc, ¹⁰⁷ Pd, ¹²⁹ I, ¹²⁶ Sn, ¹³⁵ Ce の 7 核種)の内の 2 核種(ORNL で行う試料の分離精製と分析の進捗に依存し、当初目標は ⁷⁹ Se 及び ¹⁰⁷ Pd であったが、その後 ⁹⁹ Tc 及び ⁹³ Zr に変更)を対象核種とし、keV 中性子捕獲断面積測定を実施する。本研究内容は以下の 4 項目に分類される。						
① ⁷⁹ Se, ¹⁰⁷ Pd, ⁹⁹ Tc 及び ⁹³ Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析 ② ORNL での LLFP2 核種の keV 中性子捕獲断面積測定 ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定 ④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化						
本研究の最終目的は、						
1) LLFP の第 1 対象核種(当初目標は全く実験データが存在しない ⁷⁹ Se であったが、その後 ⁹⁹ Tc に変更)について種々の測定を行い、最終結果を誤差 5~10% で得る。 2) LLFP の第 2 対象核種(当初目標は 1 組しかデータが存在しない ¹⁰⁷ Pd であったが、その後 ⁹³ Zr に変更)について測定を行い、暫定的な結果を誤差 10% 程度で得る。						
である。						
【使用主要施設】						
東京工業大学 原子炉工学研究所 広領域線質放射線照射実験室(ペレトロン加速器) 機構 東海事業所 乾式プロセス・材料試験棟 BGO 検出器、及び測定回路 米国オークリッジ国立研究所 REDC 及び ORELA						

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 13 年度は、上記の研究内容①～④の各々について、以下の事項について研究を実施した。

- ① ^{79}Se 、 ^{107}Pd 、 ^{99}Tc 及び ^{93}Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析
 - (1) 照射済み燃料からの ^{79}Se 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{107}Pd 、 ^{93}Zr の湿式分離回収のための基礎情報の一環として、幾つかの FP 核種の酸性溶液中での化学的な挙動を実験的に調べる作業を行った。
 - (2) 米国 ORNL を訪問し、LLFP の分離精製と分析を行う施設を視察し、また、LLFP の分離精製と分析についての研究打ち合わせを行った。
- ② ORNL での LLFP2核種の keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 上記の ORNL 訪問において、keV 中性子捕獲断面積実験施設(ORELA)を視察し、また、ORELA を用いた実験についての研究打ち合わせを行った。
- ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 東京工業大学原子炉工学研究所既設の高感度コンプトン抑止型検出器の超高感度化を目指すために導入した BaF_2 主検出器について、標準ガンマ線源を用いた特性試験を行った。
 - (2) 東京工業大学原子炉工学研究所既設のペレトロン加速器及び高感度コンプトン抑止型検出器を用いて、 ^{129}I 試料中に含まれる不純物同位体 ^{127}I について keV 中性子捕獲反応断面積及び捕獲ガンマ線スペクトルの測定実験を行った。
- ④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化
 - (1) ORNL の ORELA を用いた実験で使用する C_6D_6 ガンマ線検出器とほぼ同じ形状の C_6D_6 ガンマ線検出器を設計製作した。
 - (2) 設計製作した C_6D_6 ガンマ線検出器に対して、標準ガンマ線源及び東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器を用いた $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 及び $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$ 共鳴反応から発生する高エネルギー・ガンマ線を用いて「応答関数」を実験的に求めた。
 - (3) 東京工業大学原子炉工学研究所で開発した「応答関数計算用コンピュータ・プログラム」を用いて、設計製作した C_6D_6 検出器の「応答関数」を計算し、上記の実験的に求めた「応答関数」と比較検討した。
 - (4) 計算した「応答関数」を用いて、設計製作した C_6D_6 検出器の「重み関数」を求めた。

平成 14 年度は、研究内容①～④の各々について、以下の事項について研究を実施した。

- ① ^{79}Se 、 ^{107}Pd 、 ^{99}Tc 及び ^{93}Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析
 - (1) 米国 ORNL の研究者 2 名を招聘し、京都大学原子炉実験所において情報交換及び Se の各種挙動に関する共同研究を行った。
 - (2) 京都大学原子炉実験所の藤井俊行助手を米国 ORNL に派遣し、 ^{79}Se と ^{93}Zr の回収及び ^{99}Tc 金属の調整に関する共同研究を行った。
- ② ORNL での LLFP2核種の keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) ORNL の keV 中性子捕獲断面積実験施設(ORELA)を用いた実験について検討を行い、最初は ^{99}Tc についての測定を行うことを決定した。
- ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 東京工業大学原子炉工学研究所既設のペレトロン加速器及び高感度コンプトン抑止型検出器を用いて、 ^{93}Zr 試料中に含まれる不純物同位体の影響を検討するため、 ^{nat}Zr について keV 中性子捕獲実験を行った。
- ④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化
 - (1) 平成 13 年度に製作した C_6D_6 ガンマ線検出器に対して、東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器による $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 共鳴反応から発生する高エネルギー・ガンマ線を用いて、実験で得られる応答関数について検討した。
 - (2) C_6D_6 検出器の応答関数を計算し、実験的に求めた応答関数と比較検討した。
 - (3) 計算した応答関数を用いて、設計製作した C_6D_6 検出器の重み関数を求めた。

(4) keV 中性子捕獲実験の際に重要となる C_6D_6 検出器の中性子感度を検討するために、シンチレータ・セルを從来のアルミニウム製から石英ガラス製に代えた C_6D_6 検出器を設計製作した。

平成 15 年度は、研究内容①～④の各々について、以下の事項について研究を実施した。

- ① ^{79}Se 、 ^{107}Pd 、 ^{99}Tc 及び ^{93}Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析
 - (1) 米国 ORNL を訪問し、LLFP 分離・ターゲット調整に関する進捗状況の確認及び分離・調整法の改善の議論を行った。
- ② ORNL での LLFP2 核種の keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) ORNL の keV 中性子捕獲断面積実験施設(ORELA)に、本研究専有の 40m-TOF ビームラインを新たに整備した。
 - (2) 平成 13、14 年度に東工大で設計製作した 2 台の C_6D_6 検出器を ORNL に送り、(1)で新たに整備した 40m-TOF ビームラインに仮設置し、検出器信号処理回路系及びデータ収集系を構築し、総合試験を行った。
 - (3) keV 中性子捕獲実験を試みたが、ORELA の電子銃故障のために延期となった。
- ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 東京工業大学原子炉工学研究所既設のペレトロン加速器及び高感度コンプトン抑止型検出器を用いて、 ^{93}Zr 試料中に含まれる不純物同位体の影響を検討するため、 ^{91}Zr 及び ^{92}Zr について keV 中性子捕獲実験を行った。
 - (2) 東京工業大学原子炉工学研究所既設の高感度コンプトン抑止型検出器の超高感度化を目指すために、低バックグラウンド仕様の直径 15.2cm、長さ 30.5cm の NaI(Tl) 主検出器を設計製作し、標準ガンマ線源を用いた特性試験を行った。
- ④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化
 - (1) 平成 14 年度に設計製作した石英ガラスセル C_6D_6 ガンマ線検出器に対して、東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器による $^{19}F(p,\alpha\gamma)^{16}O$ 及び $^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$ 共鳴反応から発生する高エネルギー・ガンマ線を用いて、実験で得られる応答関数について検討した。
 - (2) 石英ガラスセル C_6D_6 検出器の応答関数を計算し、実験的に求めた応答関数と比較検討した。
 - (3) 計算した応答関数を用いて、石英ガラスセル C_6D_6 検出器の重み関数を求めた。
 - (4) keV 中性子捕獲実験の際に重要となる C_6D_6 検出器の中性子感度を明らかにするために、平成 13 年度に設計製作したアルミニウムセル C_6D_6 検出器及び上記の石英ガラスセル C_6D_6 検出器に対して、東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器による $^7Li(p,n)^7Be$ 反応から発生するパルス化 keV 中性子を用いて中性子感度特性試験を行った。
 - (5) 上記の 2 台の C_6D_6 検出器を ORNL に輸送し、新たに整備した 40m-TOF ビームラインに仮設置し、実際の捕獲実験における重み関数を高精度で計算するために必要な検出器周辺の物質と幾何条件データ（測定用試料、中性子ビームダクト、検出器設置台等の構成物質と配置）を取得した。

平成 16 年度は、研究内容①～④の各々について、以下の事項について研究を実施した。

- ① ^{79}Se 、 ^{107}Pd 、 ^{99}Tc 及び ^{93}Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析
 - (1) 酸化物 ^{99}Tc 試料の仕様を確定し、準備した ^{99}Tc 試料用酸化物粉末のプレス成形を行った。
 - (2) 金属 ^{99}Tc 試料製作のためのホット試験を行った。
 - (3) ^{93}Zr 試料については、製造方法及び分析方法の検討を継続した。
- ② ORNL での LLFP2 核種の keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 平成 15 年度迄に整備した ORNL/ORELA の本研究専有 40m-TOF ビームラインにおいて、本研究で設計製作した 2 台の C_6D_6 検出器の最終特性試験を行い、keV 中性子捕獲実験に備えた。
 - (2) keV 中性子捕獲実験を試みたが、ORELA の電子銃故障のために延期となった。
- ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 平成 15 年度に設計製作した低バックグラウンド仕様の直径 15.2cm、長さ 30.5cm の NaI(Tl) 主検出器を既設の高感度コンプトン抑止型検出器の主検出器と交換することにより捕獲ガンマ線検

出器の超高感度化を行い、種々のガンマ線源を用いた詳細特性試験を行った。

- (2) 東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器及び上記の超高感度コンプトン抑止型検出器を用いて、⁹³Zr 試料中に含まれる不純物同位体の影響を検討するため、⁹⁰Zr 及び⁹⁴Zr について keV 中性子捕獲実験を行った。
- ④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化
 - (1) カルネ制度で平成 15 年度に ORNL へ輸送した 2 台の C₆D₆ ガンマ線検出器を、カルネ期限の 1 年間が経過するため、東京工業大学にいったん戻した。
 - (2) 上記輸送の際の振動が原因で石英ガラスセル C₆D₆ 線検出器が破損したため、大規模な修理を行った。
 - (3) アルミニウムセル C₆D₆ 検出器については、輸送後の東京工業大学での基礎特性試験において C₆D₆ シンチレータの漏れが確認されたため、小規模な修理を行った。
 - (4) 修理完了した 2 台の C₆D₆ 検出器に対して、標準ガンマ線源及び東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器による ¹⁹F(p,αγ)¹⁶O 及び ²⁷Al(p,γ)²⁸Si 共鳴反応から発生する高エネルギー・ガンマ線を用いて詳細特性試験を実施し、両検出器の応答関数及び重み関数を求めた。
 - (5) 修理及び詳細特性試験を終了した両検出器をカルネ制度で ORNL へ再送し、ORNL/ORELA での keV 中性子捕獲実験に備えた。

【研究成果（当該年度）】

- ① ⁷⁹Se、¹⁰⁷Pd、⁹⁹Tc 及び⁹³Zr 等の LLFP 試料の分離精製と分析
 - (1) 酸化物 ⁹⁹Tc 試料については、酸化物粉末をプレス成形し、0.25mm 厚のアルミニウム製ホールダーに密封することとした。このためにプレス用器具(別添資料の図1)を作成し、グローブボックス内で約 2.5g の ⁹⁹TcO₂ 粉末をプレス成形した。プレス成形によって製作した直径 25.4mm の ⁹⁹TcO₂ ペレットを別添資料の図2に示す。また、アルミニウム製ホールダーを製作し、試料窓部分の厚さを測定したところ、0.25-0.28mm であった。
 - (2) 金属 ⁹⁹Tc 試料製作を、NH₄TcO₄→HTcO₄→(CH₂)₄TcO₄→Tc の手順で行うこととした。このため、200mg の試料を用いたホット試験を行った。その結果、(CH₂)₄TcO₄ の回収率は 60% であった。
 - (3) ⁹³Zr 試料については、製造方法及び分析方法の検討を継続した。
- ② ORNL での LLFP2 核種の keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 平成 15 年度迄に整備した ORNL/ORELA の本研究専有 40m-TOF ビームラインにおいて、本研究で設計製作した 2 台の C₆D₆ 検出器の最終特性試験を行った。C₆D₆ 検出器を設置したビームラインを別添資料の図3に示す。最終試験の結果、データ収集回路系中の動作不安定モジュールの交換及び回路系の詳細調整を行うことができた。これで ORNL/ORELA における keV 中性子捕獲実験の準備は完了した。
 - (2) 平成 16 年 9 月に 2 週間の keV 中性子捕獲実験を試みたが、ORELA の電子銃故障のために延期となった。
- ③ 東京工業大学でのガンマ線検出器の超高感度化、及び LLFP 試料中の不純物同位体に対する keV 中性子捕獲断面積測定
 - (1) 平成 15 年度に設計製作した低バックグラウンド仕様の直径 15.2cm、長さ 30.5cm の NaI(Tl) 主検出器を東京工業大学原子炉工学研究所の高感度コンプトン抑止型検出器の主検出器と交換することにより捕獲ガンマ線検出器の超高感度化を行った。この超高感度化したコンプトン抑止型検出器の概略図を図4に示す。また、この超高感度コンプトン抑止型検出器の詳細特性試験を、標準ガンマ線源及び ¹⁹F(p,αγ)¹⁶O 並びに ²⁷Al(p,γ)²⁸Si 共鳴反応からの 0.5~10.7MeV のガンマ線を用いて行った。この特性試験及びモンテカルロ・シミュレーションを組み合わせて得られた超高感度コンプトン抑止型検出器の応答関数及び重み関数の例を別添資料の図5及び図6にそれぞれ示す。図に示されているのは、次に述べる捕獲実験に用いた⁹⁰Zr 試料及び標準¹⁹⁷Au 試料に対するものである。(試料中のガンマ線の自己吸収・散乱効果が考慮されている。)
 - (2) 東京工業大学原子炉工学研究所既設のペレトロン加速器及び上記の超高感度コンプトン抑止型 NaI(Tl) 検出器を用いて、⁹³Zr 試料中に含まれる不純物同位体の影響を検討するため、⁹⁰Zr 及び⁹⁴Zr について keV 中性子捕獲実験を行った。実験には、1.5 ナノ秒にパルス化された陽子ビームによる ⁷Li(p, n)⁷Be 反応中性子源を用いた中性子飛行時間法を採用した。尚、⁹⁰Zr 及び

⁹⁴Zr 試料としては、92%以上に同位体濃縮した酸化物粉末(正味で⁹⁰Zr 試料は約 2g,⁹⁴Zr 試料は約 1g)を内径 20mm のグラファイト製円盤状ケースに入れたものを用いた。実験によって得られた⁹⁰Zr の keV 中性子捕獲断面積を別添資料の図7に、捕獲ガンマ線スペクトルを図8に示す。図7から分かるように、今回の 550keV の結果は 200keV 以上での初めての測定値である。今回の結果を JENDL-3.3 の評価値と比較すると、100keV 以下の領域では、評価値は今回の結果より 10~50% 大きく、逆に 550keV では、評価値が約 30% 小さい。keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトルについては、今回の結果は初めての測定結果である。図8には残留核⁹¹Zr の準位構造も示してあるが、中性子捕獲状態から基底準位及び低励起準位への遷移に起因する離散的高エネルギーガンマ線が特徴的である。⁹⁴Zr の keV 中性子捕獲断面積を別添資料の図9に、捕獲ガンマ線スペクトルを図10に示す。図9から分かるように、今回の 550keV の結果は 200keV 以上での初めての測定値である。今回の結果と JENDL-3.3 の評価値を比較すると、100keV 以下の領域では 30keV の結果を除いて両結果は概ね一致している。30keVにおいては、JENDL-3.3 の評価値は今回の結果より約 40% 小さい。また、550keVにおいては、JENDL-3.3 の評価値は今回の結果より約 60% 大きい。keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトルについては、今回の結果は初めての測定結果である。図10には残留核⁹⁵Zr の準位構造も示してあるが、中性子捕獲状態から基底準位及び低励起準位への遷移に起因する離散的高エネルギーガンマ線が特徴的である。

④ ORNL での実験に用いるガンマ線検出器の「重み関数」の高精度化

- (1) カルネ制度で平成 15 年 11 月に ORNL へ輸送した 2 台の C₆D₆ ガンマ線検出器を、カルネ期限の 1 年間が経過するため、平成 16 年 10 月に東京工業大学へいったん戻した。
- (2) 上記輸送の際の振動が原因で石英ガラスセル C₆D₆ ガンマ線検出器の石英ガラスセル部分が破損したため、石英ガラスセル交換、C₆D₆ 液体シンチレータの再充填等の大規模修理を行った。
- (3) アルミニウムセル C₆D₆ 検出器については、上記輸送後の東京工業大学での基礎特性試験において C₆D₆ シンチレータの漏れが確認されたため、C₆D₆ 液体シンチレータの再充填等の小規模修理を行った。
- (4) 修理完了した 2 台の C₆D₆ 検出器に対して、標準ガンマ線源及び東京工業大学原子炉工学研究所のペレトロン加速器による¹⁹F(p,αγ)¹⁶O 並びに²⁷Al(p,γ)²⁸Si 共鳴反応から発生する高エネルギー・ガンマ線を用いて詳細特性試験を実施し、両検出器の応答関数及び重み関数を求めた。
- (5) 修理及び詳細特性試験を終了した両検出器をカルネ制度で ORNL へ再送し、ORNL/ORELA での keV 中性子捕獲実験に備えた。

【成果の反映状況】

本研究で得られた研究成果うち、東京工業大学原子炉工学研究所既設のペレトロン加速器及び高感度あるいは超高感度コンプトン抑止型 NaI(Tl) 検出器を用いて測定した¹²⁷I、⁹⁰Zr、⁹¹Zr、⁹²Zr、及び⁹⁴Zr の keV 中性子捕獲断面積は、原子炉設計等に現在利用されている我が国の評価済み核データライブラリである JENDL-3.3 に格納されている上記核種捕獲断面積データの信頼性チェックに反映された。その結果、⁹⁰Zr、⁹²Zr、及び⁹⁴Zr については、本研究結果を基にして、keV 中性子捕獲断面積の再評価を行う必要があることが明らかになった。

また、捕獲断面積と同時に測定された keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトルは世界初の測定データであり、上記核種の keV 中性子捕獲反応機構解明のための理論解析用物理データとして反映された。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) T. Fujii, H. Yamana, M. Watanabe, and H. Moriyama: Extraction of Molybdenum from Nitric Acid by Octyl(phenyl)-N,N-Diisobutylcarbamoylmethylphosphine Oxide; *Solvent Extr. Ion Exch.*, **19**(1), 127-141 (2001).
- (2) T. Fujii, H. Yamana, M. Watanabe, and H. Moriyama: Extraction of Palladium from Nitric Acid solutions by Octyl(phenyl)-N,N-Diisobutylcarbamoylmethylphosphine Oxide; *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **247**(2) 435-437 (2001).
- (3) H. Harada, T. Baba, M. Igashira, H. Yamana, and S. Raman: Plan of LLFP Neutron Cross Section Measurements for Nuclear Transmutation; *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Supplement 2**, 366-368 (2002).
- (4) T. Fujii, H. Yamana, M. Watanabe, and H. Moriyama: Extraction study for Truex Process using short-lived radionuclides produced by neutron irradiation of uranium; *Solvent Extr. Ion Exch.*, **20** (2), 151-175 (2002).
- (5) T. Fujii, H. Yamana, K. Takamiya, M. Watanabe, and H. Moriyama: Adsorption of fission products on a metal surface in nitric acid solutions. Radiochemical study using a multitracer; *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **253**, 199-204 (2002).
- (6) 平成 14 年度「アクチニドの化学と工学」専門研究会報告書、塩川佳伸、山名 元（編集）、KURRI-KR-85 (2002).
- (7) 西山 潤、井頭政之、大崎敏郎: keV 中性子捕獲断面積測定用 C₆D₆ ガンマ線検出器の特性; 日本原子力学会 2003 年秋の大会 予稿集 第 I 分冊、B18、p. 37 (2003).
- (8) 大釜和也、井頭政之、大崎敏郎: Zr-92 の keV 中性子捕獲断面積及び捕獲 γ 線スペクトルの測定; 日本原子力学会 2004 年春の年会 要旨集 第 I 分冊、K13、p. 211 (2004).
- (9) 大釜和也、井頭政之、大崎敏郎: Zr-91 の keV 中性子捕獲断面積及び捕獲 γ 線スペクトルの測定; 日本原子力学会 2004 年秋の大会 予稿集 第 I 分冊、E8、p. 8 (2004).
- (10) K. Ohgama, M. Igashira and T. Ohsaki: Systematic Measurement of keV-Neutron Capture Cross Sections and Gamma-Ray Spectra of Zr Isotopes; Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, USA (2004).
- (11) K. Ohgama, M. Igashira and T. Ohsaki: Measurement of keV-Neutron Capture Cross Sections and Capture Gamma-Ray Spectra of ^{91,92}Zr; *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 333-340 (2005).
- (12) 大釜和也、井頭政之、大崎敏郎: Zr-90 及び Zr-94 の keV 中性子捕獲断面積及び捕獲 γ 線スペクトルの測定; 日本原子力学会 2005 年春の年会 要旨集、L45、p. 213 (2005).
- (13) A. Laptev, H. Harada, S. Nakamura, J. Hori, M. Igashira, T. Ohsaki and K. Ohgama: Baseline distortion effect on gamma-ray pulse-height spectra in neutron capture experiments; *Nucl. Instr. & Methods*, in printing.
- (14) Alexander Laptev、原田秀郎、中村詔司、堀順一、井頭政之、大崎敏郎、大釜和也: Baseline distortion effect on gamma-ray pulse-height spectra in neutron capture experiments; 日本原子力学会 2005 年春の年会 要旨集、L49、p. 217 (2005).

別添資料

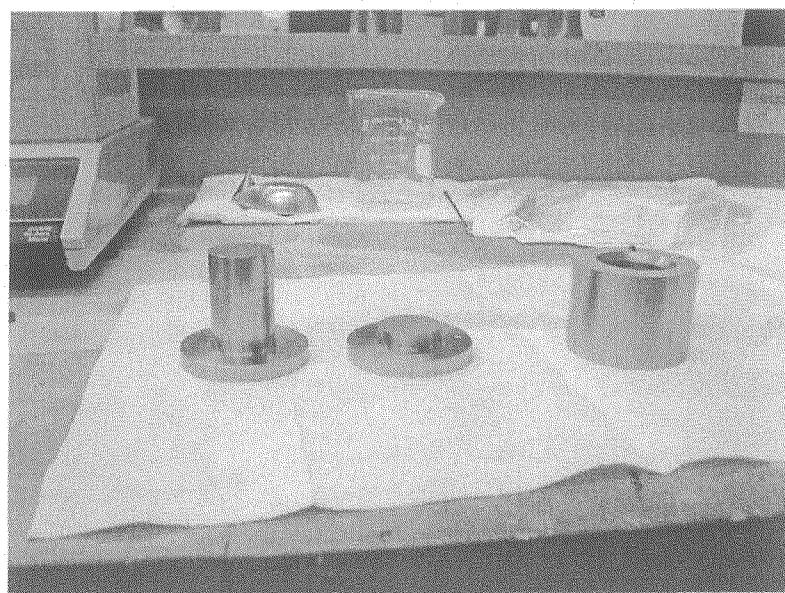


図1 ^{99}Tc 酸化物試料製作のためのプレス用器具



図2 プレス用器具を用いて製作した ^{99}Tc 酸化物ペレット

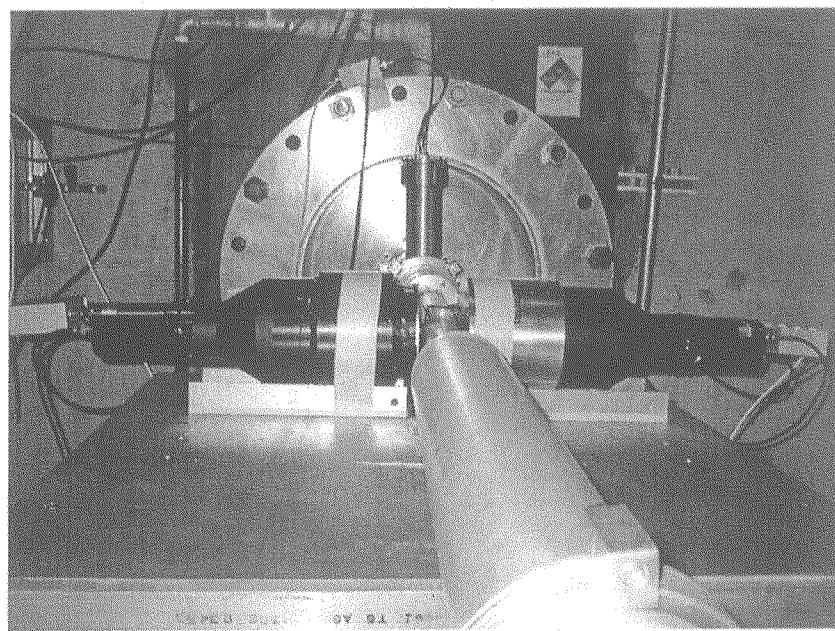


図3 2台のC₆D₆検出器を設置したORNL/ORELAの本研究専有
40m-TOFビームライン

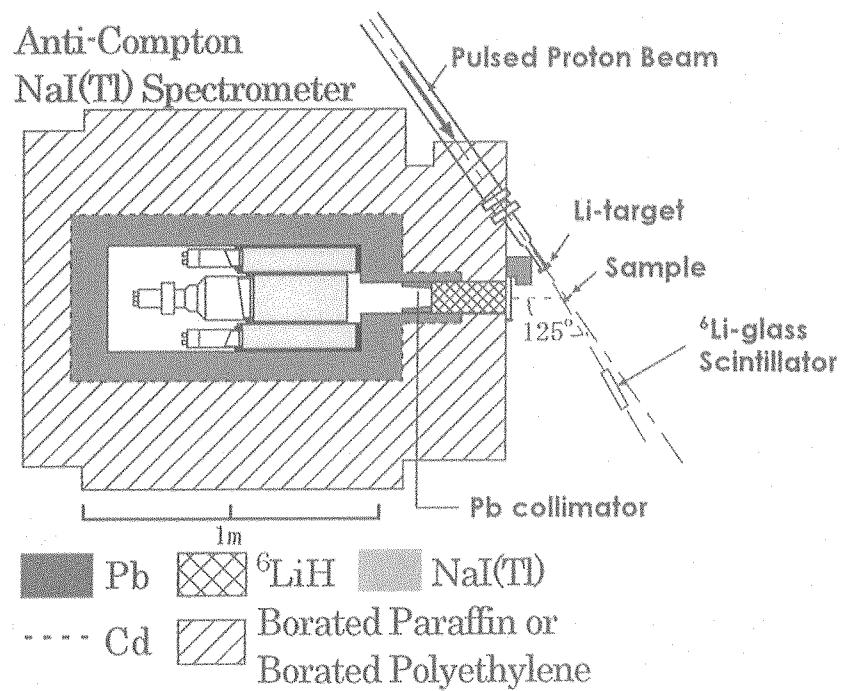


図4 超高感度化を行ったコンプトン抑止型NaI(Tl)検出器とkeV
中性子捕獲実験配置の略図

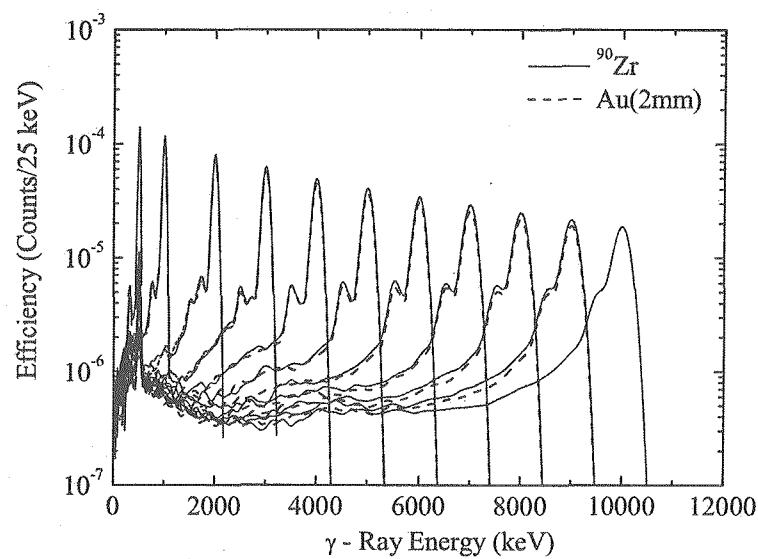


図5 超高感度コンプトン抑止型NaI(Tl)検出器の応答関数の例(約2gの⁹⁰Zr酸化物試料及び約12gの標準¹⁹⁷Au金属試料に対するもの)

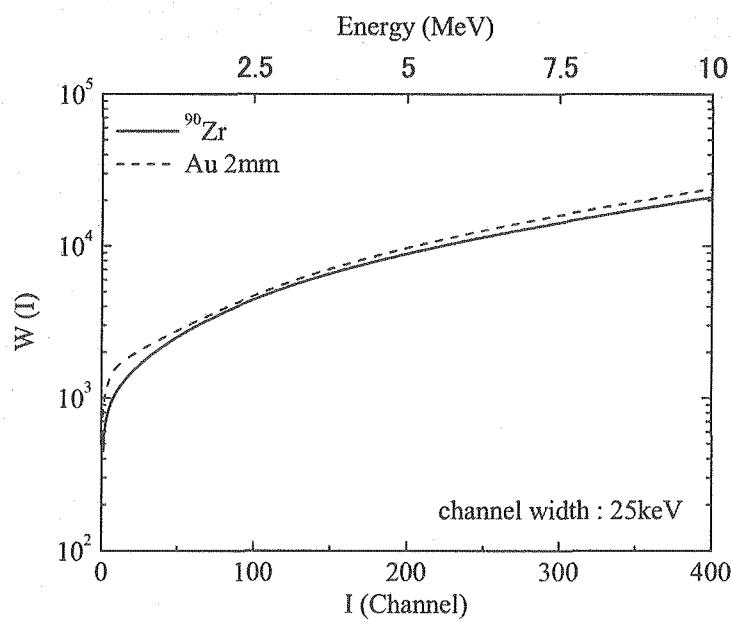


図6 超高感度コンプトン抑止型NaI(Tl)検出器の重み関数の例(約2gの⁹⁰Zr酸化物試料及び約12gの標準¹⁹⁷Au金属試料に対するもの)

別添資料

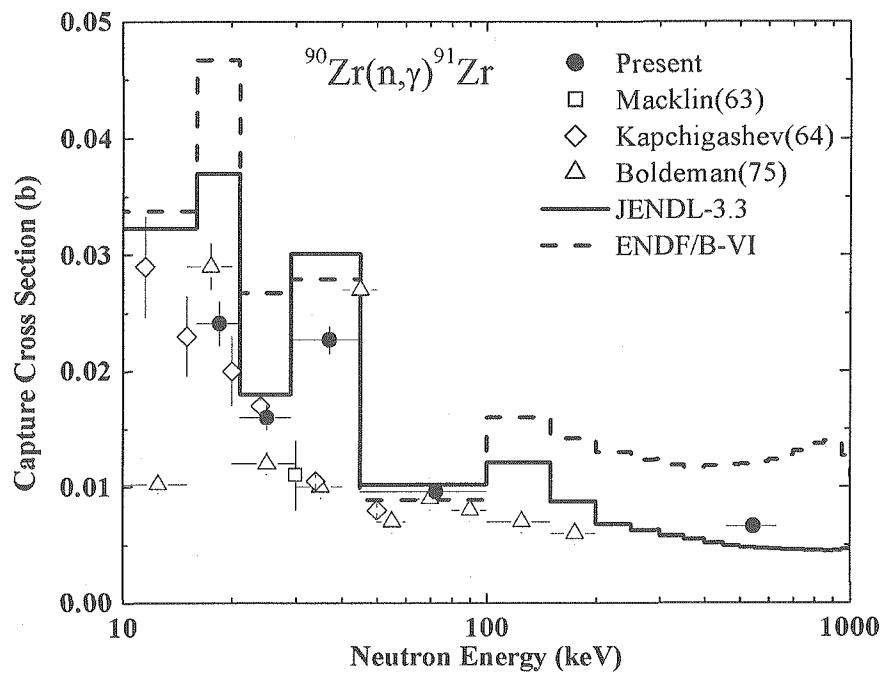


図7 ^{90}Zr の keV 中性子捕獲断面積 (JENDL-3.3 と ENDF/B-VI の評価値については、本研究の中性子BIN幅で平均した値を示している)

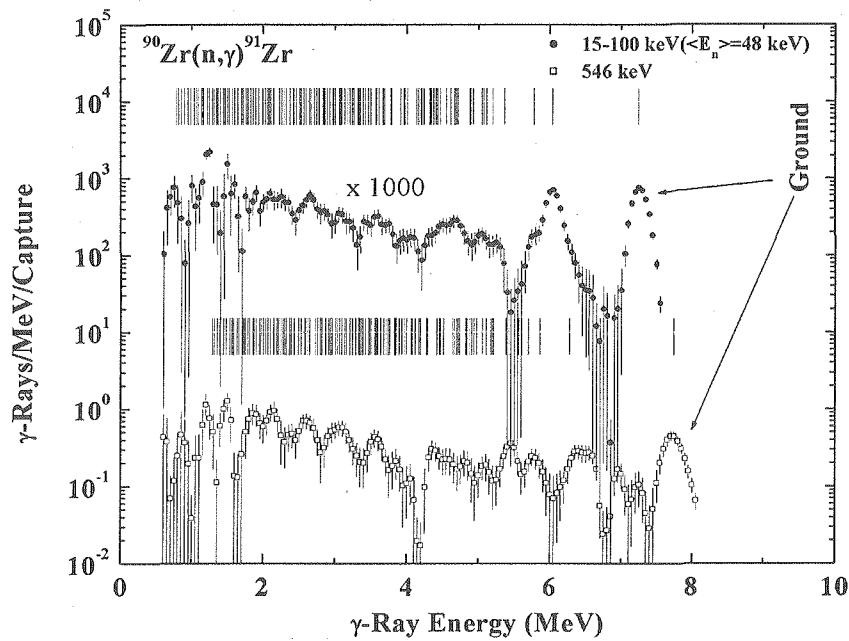


図8 ^{90}Zr の keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトル (残留核 ^{91}Zr のエネルギー準位構造も示している)

別添資料

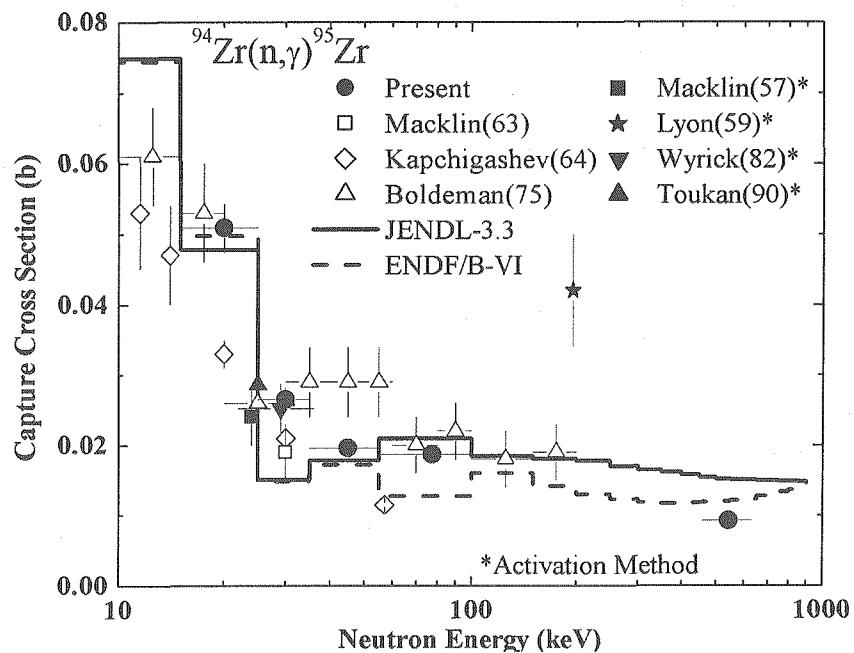


図9 ^{94}Zr の keV 中性子捕獲断面積 (JENDL-3.3 と ENDF/B-VI の評価値については、本研究の中性子ビン幅で平均した値を示している)

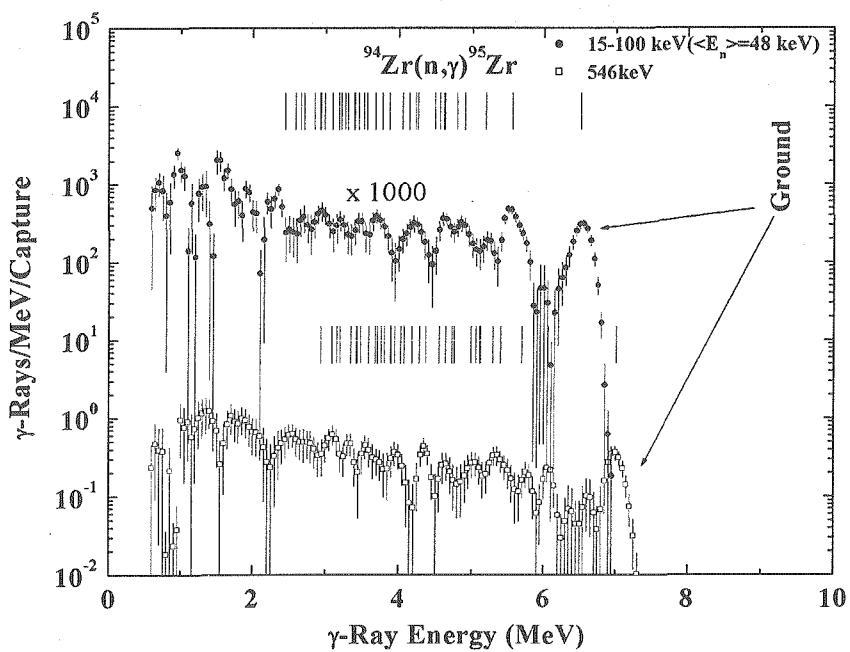


図10 ^{94}Zr の keV 中性子捕獲ガンマ線スペクトル (残留核 ^{95}Zr のエネルギー準位構造も示している)

II 核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度研究概要報告

3. 放 射 線 安 全 関 係

核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度概要報告書

研究テーマ	放射線誘起表面活性効果を用いた放射線検出システムの開発		
研究者所属、氏名			
大学側	東京海洋大学 海洋工学部 海洋電子機械工学科 教授 賞雅 寛而 助教授 波津久 達也		
機構側	東海事業所 放射線安全部 線量計測課 副主任研究員 辻村 憲雄		
研究実施場所	東京海洋大学 海洋工学部 動力エネルギー実験室 核燃料サイクル機構 東海事業所 計測機器校正施設		
通算研究期間	平成 14 年 8 月 ~ 平成 17 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 16 年 7 月 ~ 平成 17 年 3 月
研究形態	<input checked="" type="checkbox"/> 共同研究 <input type="checkbox"/> 委託研究 <input type="checkbox"/> その他 ()		
<p>【研究目的】酸化金属被膜の表面における電気化学的な反応である「放射線誘起表面活性効果、Radiation Induced Surface Activation, RISA」を利用した、新しい放射線検出システムの開発に関する研究を行う。</p> <p>「放射線誘起表面活性効果」を利用した検出器は、従来の検出器では測定不可能な数 kGy/h 以上の γ 線の計測が可能であり、ダイナミックレンジが 6 枠以上と広いこと、物理化学的に安定な素材を使用しており極限環境下でも安定動作することなどの特徴を持つ。研究では、未だ未解明である「放射線誘起表面活性効果」の原理、放射線検出器としての特性に関する研究を進めるとともに、セル内等局所的な線量率の計測装置等、放射線管理に広く適用できる新しい放射線検出システムとしての実用化研究も合わせて行う。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>(1) 平成 14 年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 放射線情報の把握と検出器に要求される仕様の選定: 1) 再処理施設等における局所的高線量率区域の状況調査 2) センサーの仕様の検討 3) 現行の高線量率モニタの特性調査 ② 酸化金属及び電極の種類・膜仕様・被覆の選定: 1) 各パラメーター (酸化金属種類 ($ZrO_2, TiO_2, Al_2O_3, CuO_2$ 他)、被膜製作方法 (スパッタリング、溶射、アークオンプレーティング他)、被膜厚さ (20-200nm)) による放射線感度特性試験 2) 多層電極、櫛形電極など電極の形状による放射線感度特性試験 ③ センサー特性試験: 耐高温・耐高圧力特性試験 2) 放射線種感応試験 (γ 線、X 線、α・β 線他) <p>(2) 平成 15 年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 酸化金属の種類・膜仕様・被覆の選定: 前年度の検討・試験 ② センサー特性試験: 前年度の検討・試験 ③ 試験器のシステム設計と製作: 1) 上記、基礎特性試験の結果に基づく、適用する場に適した検出器システムの設計等、試験器の製作 2) 計測機器校正施設照射設備を用いた性能試験 <p>(3) 平成 16 年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 実用機のシステム設計と製作: 実用機製作。計測機器校正施設照射設備を用いた性能試験 ② 実用化試験: 原子炉施設等でのフィールド実証試験 ③ 成果のまとめ: 研究のまとめ 			

【使用主要施設】

- (1) 東京海洋大学 海洋工学部 動力エネルギー実験室 放射線実験施設
- (2) サイクル機構 東海事業所 計測機器校正施設 ^{137}Cs γ 線照射装置,
中硬 X 線照射装置, β 線照射装置

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 14 年度は、放射線情報の把握と検出器に要求される仕様の選定：再処理施設等における局所的高線量率区域の状況調査 センサーの仕様の検討、現行の高線量率モニタの特性調査、酸化金属及び電極の種類・膜仕様・被覆の選定、各パラメーター、被膜製作方法、被膜厚さによる放射線感度特性試験 多層電極、櫛形電極など電極の形状による放射線感度特性試験、センサー特性試験：耐高温特性試験、放射線種感応試験 (γ 線、X 線、 α ・ β 線他)を行った。

平成 15 年度は、前年度に引き続き、酸化金属の種類・膜仕様・被覆の選定：前年度の検討・試験、センサー特性試験、またこれら基礎特性試験の結果に基づき、適用する場に適した検出器システムの設計等を行い、試験器の製作、計測機器校正施設照射設備を用いて性能試験を行った。さらに RISA 放射線検出器のメカニズム評価、中性子照射実験を行い、その可能性の高さを実証した。

最終年度である平成 16 年度は、詳細高温特性試験、加速器粒子計測試験、原子炉施設におけるフィールド実証試験を行い、RISA 放射線検出器の特性の高さ、耐久性の高さを実証した。また RISA 高線量率計実用機のシステム設計と製作を行い、性能試験を行った。モンテカルロミュレーションおよび実験結果から、RISA 放射線検出器のメカニズムをほぼ明らかにした。最後に本公募研究のまとめを行った。

【研究成果（当該年度）】

RISA 効果を利用した放射線検出器は、放射線による酸化チタン被膜の伝導率の変化を検出して、放射線を検出するという今までにないタイプの放射線検出システムである。平成 16 年度の研究課題の中で、特に重要と考えられる放射線誘起表面活性のメカニズム及び RISA 放射線検出器の作動基礎特性を中心に以下にその成果を述べる。

1. 高温特性

RISA 放射線検出器の高温環境下への適用性を評価するため、 ^{60}Co - γ 線照射時における検出信号の温度依存特性について整理した。使用された検出素子は、幅 6 mm 角、厚さ 1 mm のアルミナ板表面に厚さ 250 nm ルチル型酸化チタン被膜が蒸着された構造となっており、その表面に電極が設置されている（図 1）。この電極間のコンダクタンス変化を計測することにより、放射線が検出される。検出素子を高温容器内に設置し、雰囲気温度を常温から 310°C まで変化させ、 ^{60}Co - γ 線の各照射強度に対する検出器のコンダクタンス変化を測定した。各雰囲気温度における RISA 検出器の S/N 比（暗電流（ γ 線非照射時の出力電流値）に対する出力信号（ γ 線照射時の出力電流値）の比）は、120°C に超えると急激に減少し、250°C 以上では 1 以下となることが確認された（図 2）。例えば S/N 比の下限値を 100 とすると、検出可能な温度範囲は約 140°C までとなる。100°C までの温度域において、放射線強度に対する検出特性を測定した結果、RISA 検出器の出力信号は、温度によらず γ 線強度に比例してほぼ一定に増加することが確認された（図 3）。

2. 加速粒子線応答

RISA 放射線検出器のビームロスモニタとしての使用特性を明らかにするために、高エネルギー加速器研究所において He、C イオン（それぞれ 6 MeV/u）ビーム照射実験を行い、荷電粒子に対するエネルギー依存性、粒子束依存性、時間分解能を調べた。使用した RISA 検出素子は 15×15 mm 厚さ 1 mm のアルミナ基板表面にルチル型酸化チタン膜を蒸着させた

物である。酸化チタン膜の厚さは 100、250、1000nm の 3 種類を使用した。酸化チタン膜の表面には約 14mm 離れた電極が設置されている。一方の電極に電圧を印加し、もう一方の電極から信号を取り出す（図 4）。照射イオン数測定には二次電子放出型モニタ(SEM)を用い、電荷積分型前置増幅器二次電子数を測定することによって SEM を通過したイオン数を決定した。観測された増幅器出力波形では、空気のイオン化による立ち上がりの遅い信号が観測された。C イオン照射実験ではこの問題点を解決するため、真空チャンバーの中に RISA 検出素子を設置し、真空中での照射を行った。また、アルミニウムのエネルギーーデグレータを使用し、エネルギーを減衰させ、幾つかのエネルギーでの荷電粒子照射実験を行った。信号の立ち上がりは約 1μsec. であり、RISA 放射線検出器では良好な時間分解能が期待できることが分かった（図 5）。RISA 検出素子への荷電粒子の照射エネルギーと出力の波高値は比例しないが、波高値を酸化チタン膜へのエネルギー付与の関数とすると良い比例関係を示し、粒子エネルギーを RISA 放射線検出器で十分な精度で検出できることが明らかにされた（図 6）。

次に同様の加速粒子 RISA 計測システムを用いて、放射線医学研究所の重粒子線ガン治療装置 (HIMAC) の He イオン照射実験を行った。実験パラメーターは、粒子エネルギーおよび照射イオン束であり、加速粒子は厚さ 1μm のハーバ窓から RISA 検出素子に照射される。その結果、1) 2 日間にわたる 6MeV の繰り返し高エネルギーイオン照射で RISA 検出素子は損傷せず測定精度にも問題がないこと、2) 電子数は照射荷電粒子のエネルギーに比例せずごく表面でのエネルギー付与が RISA 検出器の出力に寄与している（図 7）ことが、それぞれ明らかにされた。

3. 炉内計測

平成 15 年度に引き続き、原子炉内放射線検出器として、使用可能かどうかを確認するために、東大弥生炉内における放射線計測実験を行った。図 8、9 はその計測結果であり、炉の出力に対応した応答が得られていることがわかる。図 9 には、カドニウム 1mm 厚板で検出素子の周りを覆った場合の検出結果が合わせて示されている。カドニウムは中性子吸収により γ 線を照射するので、カドニウムのカバーで出力値が上昇したことは、定性的に RISA 検出素子はガンマ線のみに対して感応し、中性子線に対する応答性がないことを示している。また、非常に強放射線場で繰り返しの計測によっても偏差が小さいことから、RISA 放射線検出素子は十分に炉内放射線検出器としての利用が可能であることが示された。

4. RISA 放射線検出器のメカニズム

現段階で考えられる RISA 放射線検出器の作動メカニズムは、平成 14 年度に示されたように、たとえば γ 線が母材内でコンプトン散乱を生じ、この励起電子が酸化皮膜に到達しキャリアを発生するという過程である。しかしながら、平成 15 年度に行われた実験結果から、必ずしもこのような過程ではなく、図 10 に示されるように母材（アルミナ）内で生成された電子正孔対が酸化皮膜（チタニア）に供給されて伝導度が生じているというメカニズムが提唱された。このメカニズムを検証するために、γ 線照射により RISA 放射線検出素子内に発生する電子と光子の挙動をモンテカルロシミュレーションした（図 11）。ここでは、⁶⁰Co-γ 線、検出部中心へのペンシリビーム放射線の入射方向を Front と Back としている。表 1 にシミュレーションの照射条件を、図 12 にシミュレーションによって計算された TiO₂ 層へのエネルギー付与量（条件 3 の付与量を用いて計測値に基準化）を示す。シミュレーションではペンシリ照射が仮定されているので、シールドボックス板のない条件 1,2 では一様照射である実験値と異なっているが、そのほかの条件では非常に良い一致を示している。

これまでの各年度で行われたシミュレーション結果を整理すると、

- 1) アルミナ基盤 (Al₂O₃) 中における 1MeV~10keV の電子の飛程は 1mm~1μm で、1keV 以下では 0.1μm を下回る (H15)。
- 2) TiO₂ 層を横切る粒子数は光子よりも電子の割合が多く、それらは大部分、TiO₂ 層に隣接

- する基板材やカバー材からのコンプトン電子によるものと考えてよい (H15)。
- 3) TiO_2 層へのエネルギー付与は、ほとんどが電子によるもので、その量と実験的に得られる TiO_2 層に流れる電流信号とは比例的に対応している (H16)。
- 4) 一方、アルミナ (Al_2O_3) 基板で発生する電子のエネルギーのうち制動放射に転換する割合は約 0.7% である (H16)。

TiO_2 層のバンドギャップ (3eV 程度) に対して、隣接する基板層のバンドギャップはアルミナ (Al_2O_3) では 8.8eV とかなり大きいことから、 Al_2O_3 層の伝導帯にいる電子と価電子帯にいる正孔は、どちらもエネルギー的に安定な TiO_2 層へ流入していくという、図 10 のメカニズムがもっとも現時点では正しい可能性が高いことが示された。

5. 高線量率計の試作

原子炉施設や放射線施設、また宇宙放射線（プライマリ）、海洋放射線、放射性物質船舶輸送の放射線管理において求められている、数 KGy/hr の高放射線環境場の高放射線計測システムを作成することを目的に、海洋大と機構は RISA 高線量率計の試作を行った（図 13）。

この線量率計は、後述するように、医学総合研究所における医療放射線計測システムの開発および高エネルギー加速器研究機構における加速粒子ビームロスモニタリングシステムの開発に使用される。また、RISA 放射線検出器はマイラーなどのカバー材料の選定により、十分に Sv モニターとして使用可能であることが示されている(H15)ので、この方面的利用も期待されている。

【成果の反映状況】

本公募型研究で得られた研究成果は、RISA 放射線検出器の基礎的事象解明結果が主であるが、前述した RISA 高線量率計の試作および市販化のほかに、医学総合研究所における医療放射線計測システムの開発および高エネルギー加速器研究機構における加速粒子ビームロスモニタリングシステムの開発に利用反映されている。後者においては日本原子力研究所との共同開発となっている平成 18 年度運転開始予定の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のビームロスモニタリングへの採用が予定されている。一方機構における放射線計測システムにも RISA 放射線検出器の使用が検討されている。通常は人が立入らないような閉鎖的かつ温度や湿度等が通常の放射線計測器の動作環境から著しく逸脱している高レベルの放射性物質を取り扱う放射性廃棄物処理施設・貯蔵施設のたとえばセル内部や配管の表面等のような環境下において、超高放射線量（率）を高い信頼性をもって遠隔で計測する実用的かつ経済的な技術が未だ確立されていない。従って、RISA 放射線検出器の使用により、放射線や放射性物質の漏洩が懸念される箇所の経年劣化等をきめ細かく監視し予防的に対策することができると期待されている。

以上、RISA 放射線検出器の基礎的開発を行ってきた本公募型研究は、その成果を広く一般放射線計測システムの改善に寄与している。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 賞雅寛而、辻村憲雄、岡本孝司、友澤秀征、中田仗祐、「放射線誘起表面活性を利用した放射線検出器」、高エネルギー加速器研究機構・研究会(第17回)要旨論文集、pp. 15-16 (2003).
- 2) H. Date, H. Tomozawa, T. Takamasa, K. Okamoto, M. Shimozuma, "Development of RISA (Radiation Induced Surface Activation) Detectors for Onsite Sensing and Microdosimetry", 放射線リスクと分子・細胞レベルの影響メカニズムに関する WS 講演論文集、#P3 (2003).
- 3) 賞雅寛而、高野充代、岡本孝司、友澤秀征、中田仗祐、辻村憲雄、「RISA 放射線検出器による β ・X 線計測」、原子力学会 2003 年春の年会要旨集年会要旨集第 I 分冊、p. 130 (2003).
- 4) T. Takamasa, T. Hazuku, N. Tujimura, K. Okamoto, H. Tomozawa, J. Nakata, H. Date, "Radiation Detector Using Radiation Induced Surface Activation", Proc. the Second Int. Sympo. Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-2), A6-4, (2003).
- 5) T. Takamasa, T. Hazuku, N. Tujimura, K. Okamoto, H. Tomozawa, J. Nakata, H. Date, "Development of Radiation Detector Using Radiation Induced Surface Activation", Proc. the 17th WS on radiation detectors and their uses, pp. 35-45 (2003).
- 6) 伊達広行、友澤秀征、辻村憲雄、賞雅寛而、岡本孝司、下妻光夫、「RISA (Radiation Induced Surface Activation) を利用した線量計の開発」、日本放射線技術学会 第 59 回北海道部会秋季大会 (2003).
- 7) 賞雅寛而、辻村憲雄、伊達広行、宮島光弘、岡本孝司、友澤秀征、「RISA 放射線検出器の特性試験」、高エネルギー加速器研究機構・研究会(第18回)要旨論文集、pp. 73-74 (2004).
- 8) 賞雅寛而、波津久達也、高野充代、辻村憲雄、伊達広行、宮島光弘、岡本孝司、友澤秀征、「RISA 放射線検出器の物理特性」、日本原子力学会 2004 年春の年会 要旨集第 I 分冊, p.190 (2004).
- 9) T. Takamasa, T. Hazuku, N. Tujimura, K. Okamoto, H. Tomozawa, J. Nakata, H. Date, "Radiation Detector Using Radiation Induced Surface Activation", Journal of Nuclear Science and Technology, pp.152-155 (2004).
- 10) T. Takamasa, M. Takano, K. Okamoto, H. Date, H. Tomozawa, J. Nakata, N. Tujimura, "Fundamental Study on Designing Radiation Detectors Using Radiation Induced Surface Activation", Proc. 11th International Cong. of the Int. Radiation Protection Association (IRPA 11), CD-ROM #3h71 (2004).
- 11) H. Date, H. Tomozawa, T. Takamasa, K. Okamoto, M. Shimozuma, "Monte Carlo Simulation for Designing Radiation Detectors Using Radiation Induced Surface Activation", Proc. 11th International Cong. of the Int. Radiation Protection Association (IRPA 11), CD-ROM #3g3 (2004).
- 12) T. Takamasa, T. Hazuku, M. Takano, N. Tujimura, H. Date, M. Miyajima, K. Okamoto, H. Tomozawa, "A Novel Dosimeter Based on Radiation Induced Surface Activation", Proc. 14th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD14), (2004).
- 13) 伊達広行、友澤秀征、賞雅寛而、岡本孝司、下妻光夫、「放射線誘起表面活性による電気伝導メカニズムについて」、日本機械学会 2004 年度年次大会講演資料集 Vol. 8, pp. 159-160 (2004).

- 14) 高野充代、賞雅寛而、波津久達也、友澤秀征、辻村憲雄、佐々木慎一、齋藤究、「RISA 放射線検出器の特性評価」、高エネルギー加速器研究機構・研究会（第 19 回）要旨論文集、pp. 15-16 (2005).
- 15) 高野充代、賞雅寛而、波津久達也、辻村憲雄、岡本孝司、友澤秀征、「RISA 放射線検出器の高温特性」、日本原子力学会 2005 年春の年会要旨集第 I 分冊、p. 180 (2005).
- 16) M. Takano, T. Hazuku, T. Takamasa, K. Okamoto, H. Date, H. Tomozawa, N. Tujimura, "Development of Innovative Radiation Detector Using Radiation Induced Surface Activation", 13th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-13), ICONE13-50454 (2005).

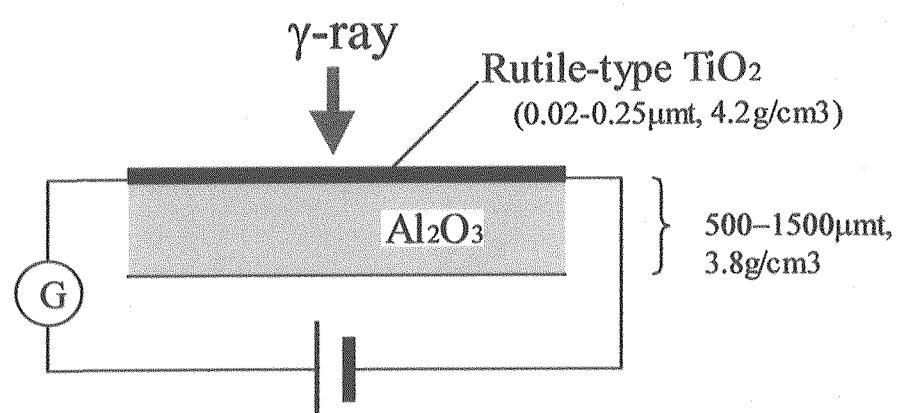


図1 RISA放射線検出素子

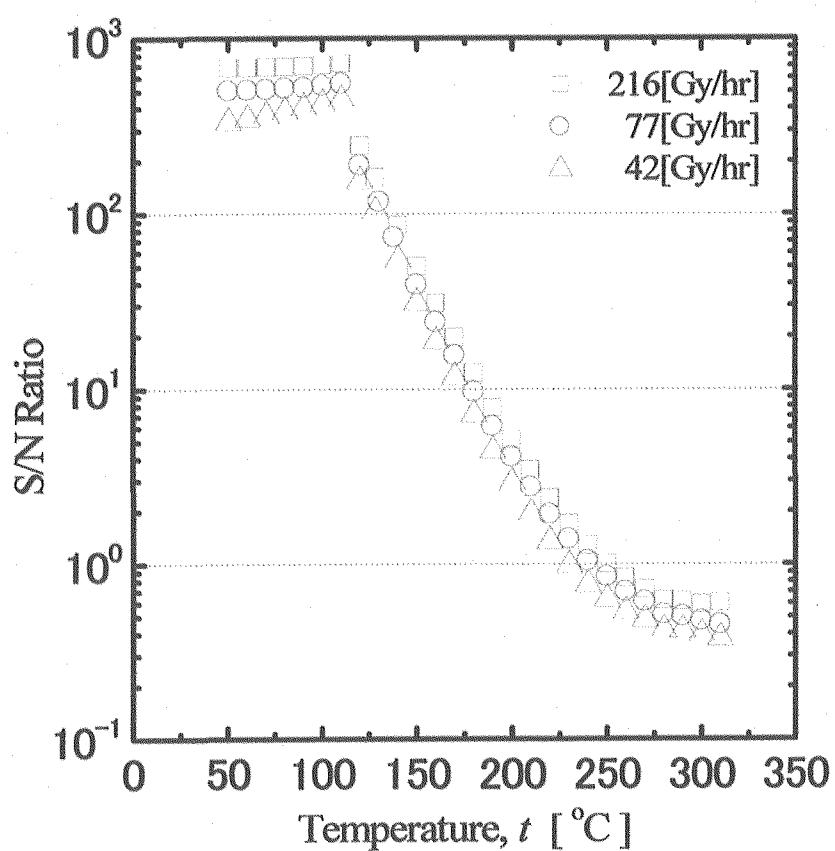


図2 使用可能温度域

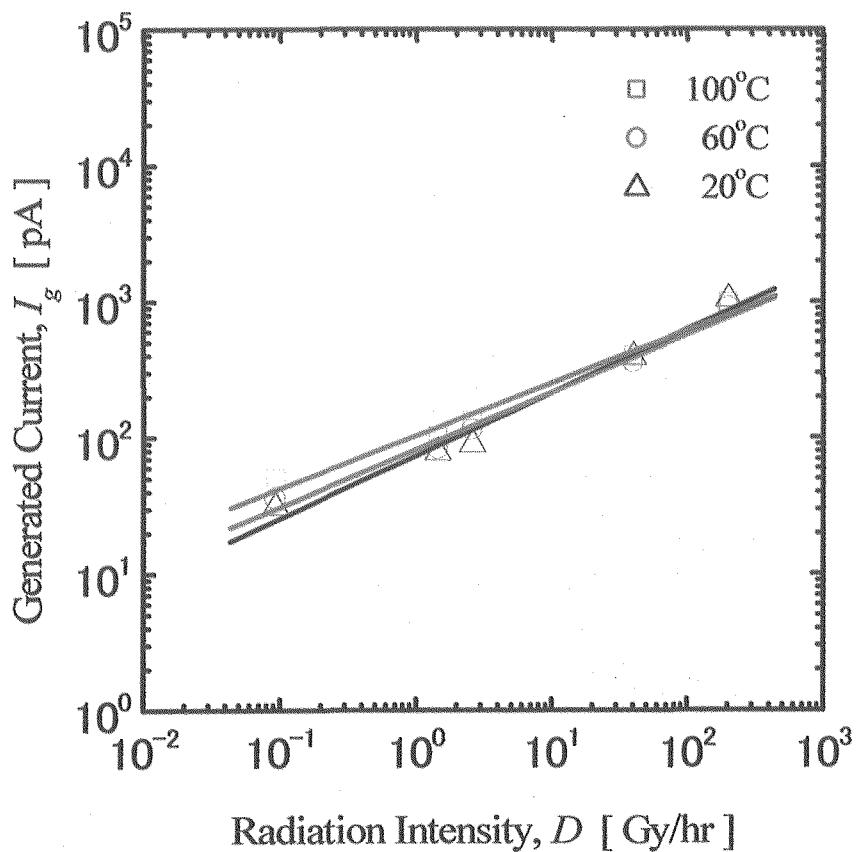


図3 各温度域においての線形性

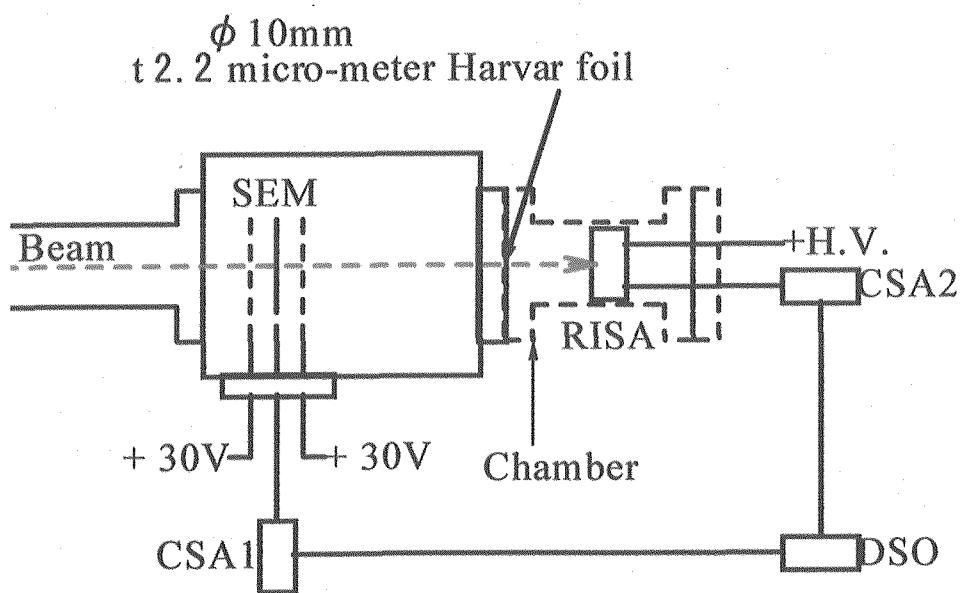


図4 加速粒子計測実験装置

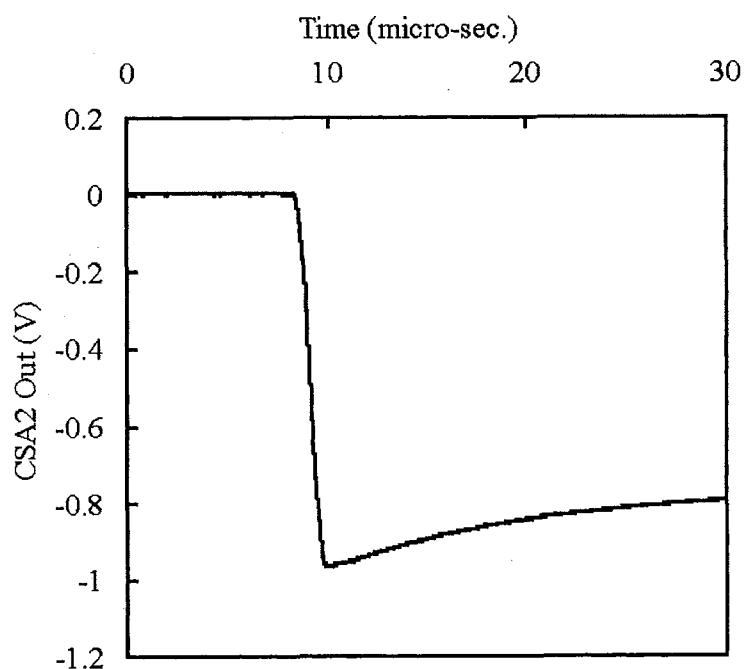


図 5 RISA 検出素子の真空中照射時の出力波形

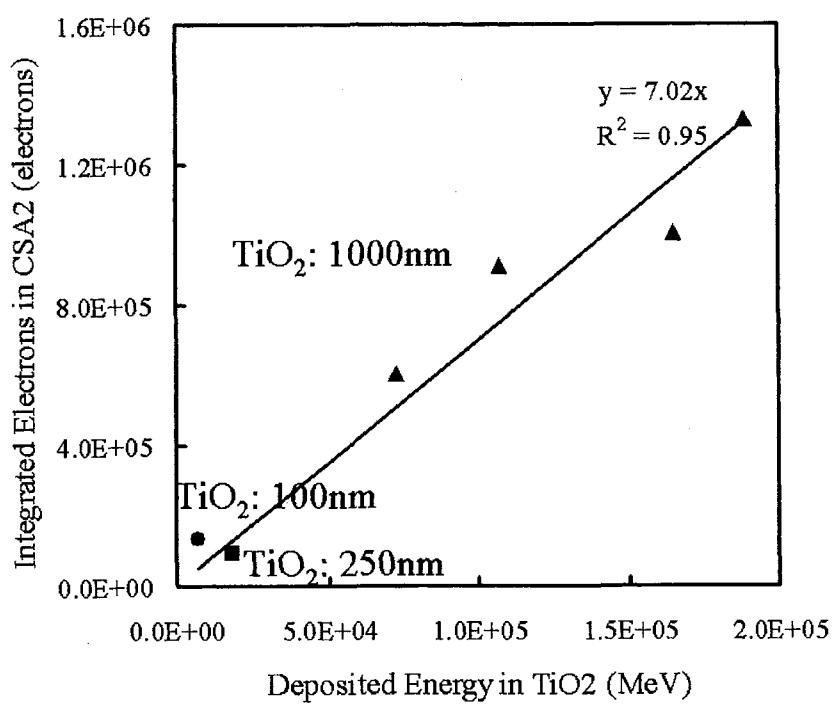


図 6 RISA 検出素子出力と酸化チタンへのエネルギー付与の相関

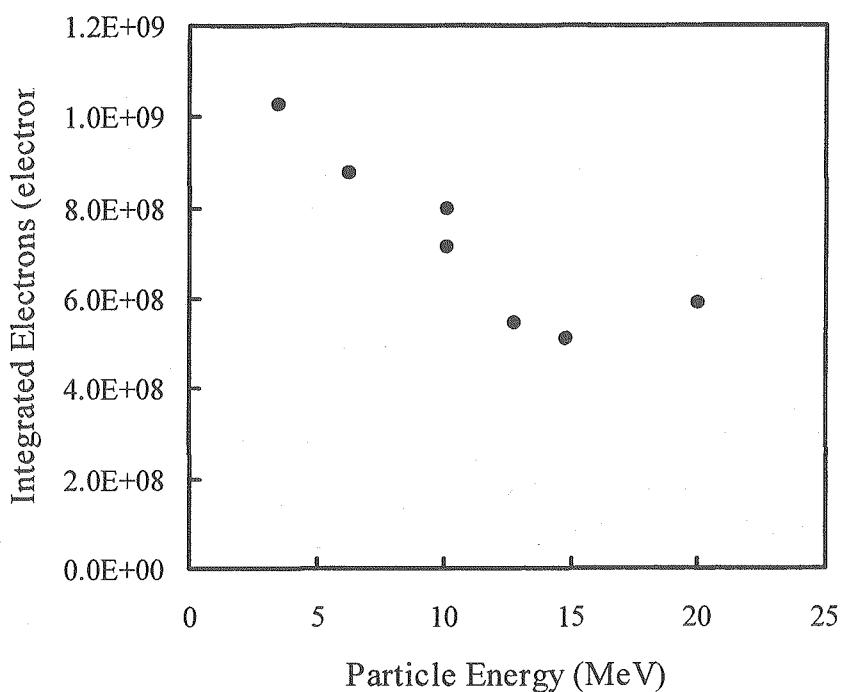


図 7 積分電子数と荷電粒子のエネルギー

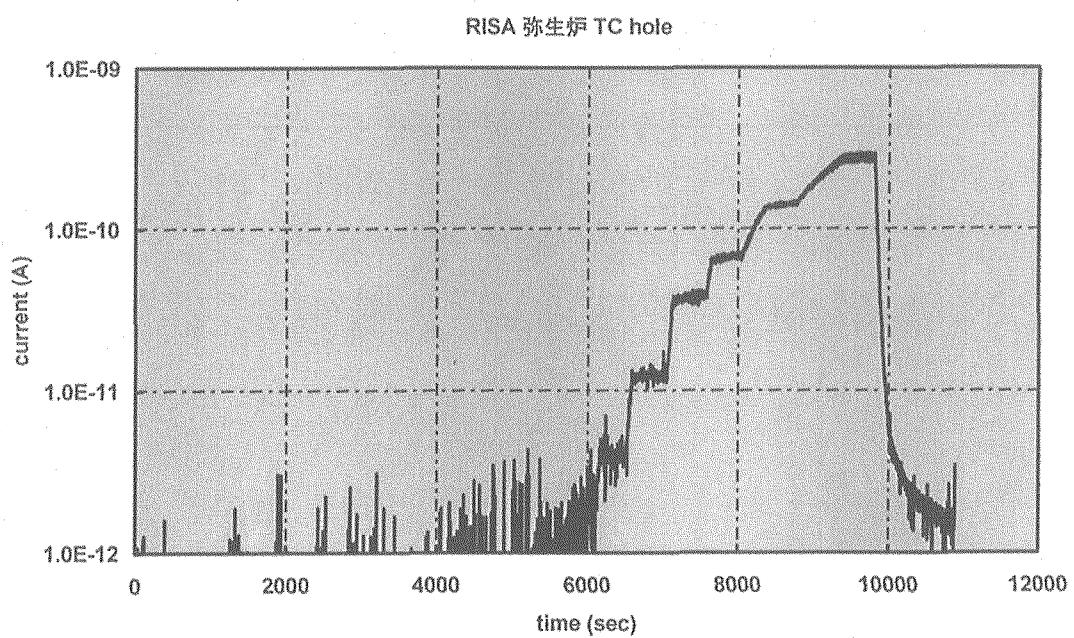


図 8 RISA 検出器出力トレース

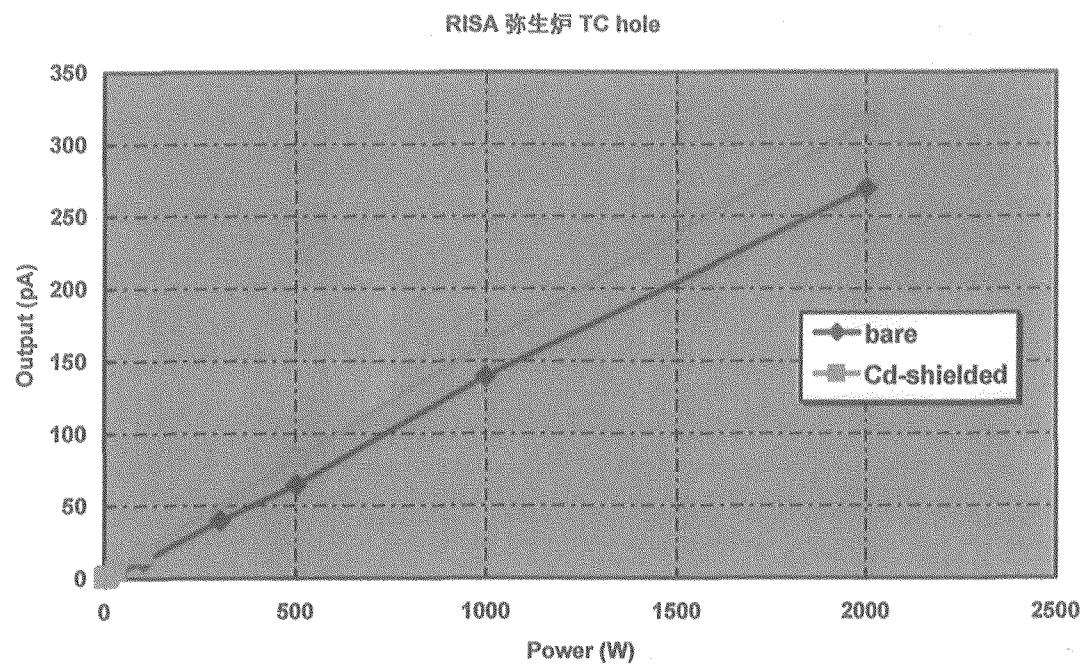


図 9 炉出力と出力電流

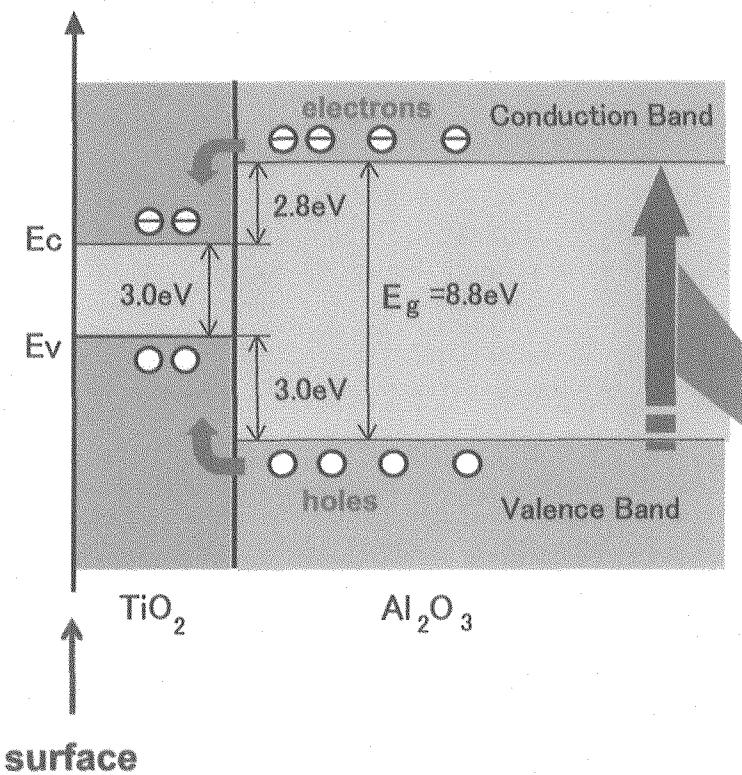


図 10 RISA 検出器のメカニズム

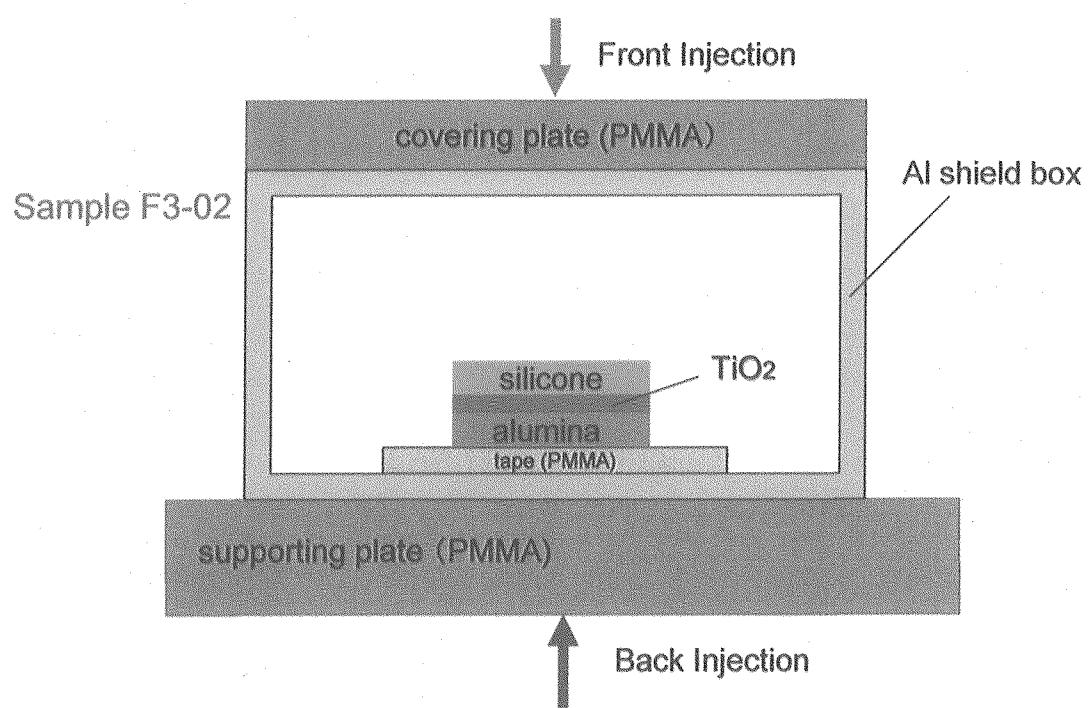


図 11 モンテカルロシミュレーション

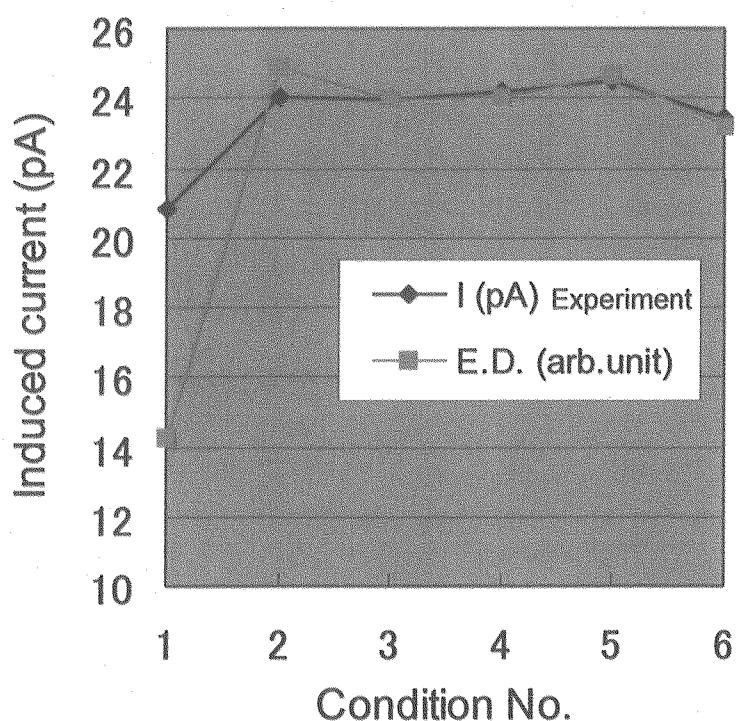


図 12 シミュレーション結果

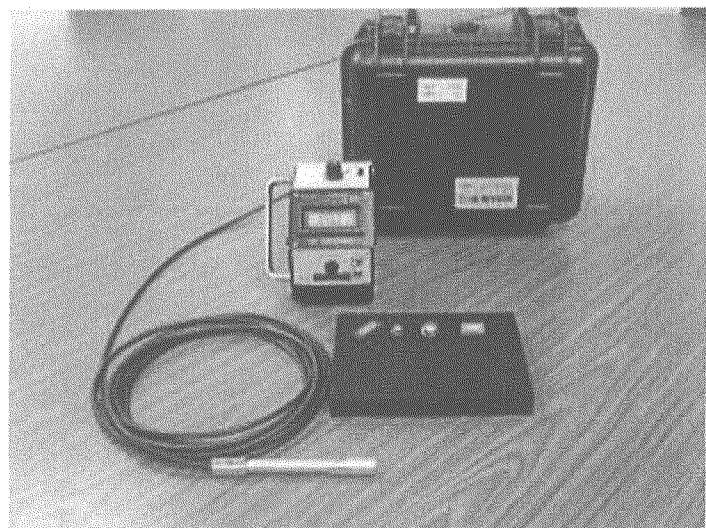


図 13 海洋大-JNC2004、RISA 高線量率計
(応用技研製作)

表 1 シミュレーション条件

No.	injection	Screening plate
1	front	none
2	back	none
3	back	2mm PMMA
4	back	4mm PMMA
5	back	6mm PMMA
6	back	20mm PMMA

photon history: 3,000,000

II 核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度研究概要報告

4. 地層処分・地層科学関係

核燃料サイクル公募型研究に関する平成 16 年度概要報告書

研究テーマ	緩衝材およびその周辺岩盤の力学的安定基準の作成					
研究者所属、氏名						
大学側	京都大学 農学研究科：小林晃(助教授)					
機構側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ：油井三和(グループリーダー)					
研究実施場所	京都大学 農学研究科 地域環境科学専攻 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 地層処分基盤研究施設					
通算研究期間	平成 14 年 9 月 ~ 平成 17 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 16 年 7 月 ~ 平成 17 年 3 月			
研究形態	<input checked="" type="checkbox"/> 共同研究 <input type="checkbox"/> 委託研究 <input type="checkbox"/> その他 ()					
【研究目的】						
高レベル放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材も含めた閉鎖後の数百年の過渡期の岩盤の力学的挙動は、その後の長期にわたる挙動の初期条件となることから、この間の安定性の確保は非常に重要なと考えられる。仮に、閉鎖後数百年における力学的安定性を確保する目安を示し、その目安を満足することにより力学的に安定であるという前提条件の下で安全評価を行えるとすれば、安全評価での不確実性を減少させることができる。そこで、サイト選定の一つのよりどころとなる、岩盤および緩衝材の安定性に関する破壊基準チャートを作成することを目的とする。これらのチャートにより、サイト選定時の天然バリア(地質環境条件)における力学的安定性の定量的な比較が可能となる。						
【研究内容(概要)】						
(1) 岩盤及び緩衝材の水理破碎試験 模擬岩体及び緩衝材ブロックを供試体とした水理破碎試験を実施する。模擬岩体は、処分孔周辺の岩盤を模擬した構造とし、AE 計測、比抵抗トモグラフィー探査等により内部の状況を非破壊で調査する。 緩衝材ブロックは、局所水圧負荷状態での膨潤試験、種々の拘束条件下での水理破碎試験を行い、緩衝材の力学的挙動についてデータを収集する。						
(2) 解析手法の整備 ランダム亀裂場の亀裂進展解析及び有限変形連成解析を行う。(1)の試験結果を用いてモデルの検証を行う。						
(3) 破壊基準の作成 (1)(2)の実施により検証されたモデルを用いて種々の条件を想定して破壊予測を行い、基準チャートを作成する。 基準の作成に当たっては、想定する岩盤条件をサイクル機構の調査データを参考に行う。また、適用例の条件設定に関してもパブリックアクセスにつながる実用的なものとする。						
【使用主要施設】						
機構 東海事業所 地層処分基盤研究施設 COUPLE 実験装置、X 線 CT スキャン装置						

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 14 年度は、COUPLE での大型試験の供試体となるモルタルの配合検討、クラックの発生のための水圧条件などの検討を京都大学にて行い、上記の検討から決定した配合による模擬岩体を用いて COUPLE 試験装置を用いて水理破碎試験を実施した。試験に際しては、AE 測定、電気比抵抗測定を載荷中に実施した。

平成 15 年度は、KIDBEN 実験装置を改造し、緩衝材に局所的に高水圧が作用した場合の内部の変化状況を観測する実験を実施した。緩衝材は密度、含水比、水圧上昇速度、ペントナイト/砂比をパラメーターとした。また、破壊状況を観察するために、X 線 CT スキャン装置で内部破壊状況を観察し、破壊メカニズムについて考察した。

また、模擬岩体の破壊韌性を求める実験を行い、破壊力学を用いた解析を実施した。

平成 16 年度は、模擬岩体の破壊実験を小規模供試体を用いて追加実験を行った。また、緩衝材に関しては、膨潤圧の影響を考察するために、追加実験を実施した。以上の実験結果を再現する数値モデルを作成し、岩盤、緩衝材の破壊基準となるグラフを作成した。

【研究成果（当該年度）】

1. 緩衝材の膨潤圧の影響に関する実験

破碎した後、膨潤により破損部分が回復する状況を調べるために、複数回載荷する多段階圧力上昇実験を行った。ケース 1 は一定流量注入、ケース 2 は一定圧力注入で行った。どちらのケースにおいてもまず、一定の水圧載荷条件（ケース 1 は 4cc/min、ケース 2 は 49kPa/min）で載荷して破碎させる。図-1 にケース 1 の注入圧力の経時変化図を示す。1 回目の破碎後、低圧で約 15 分注入した後、4cc/min で再載荷し 2 回目の破碎を観察した。その後、注入速度を 2cc/min, 3cc/min として注入した。2cc/min のとき 0.5MPa, 3cc/min のとき 1MPa であった。この 1MPa は概ね同供試体の膨潤圧に等しい圧力である。この圧力で約 20 分注入した後、4cc/min で注入すると供試体圧力は急上昇し、1 回目の破碎圧力と同じ圧力で破碎した。

ケース 2 では一度破碎した後、水の供給をせずに 3 時間静置してから載荷すると、供試体は 0.7MPa で破碎した。その後膨潤圧（0.5MPa）より低い注入水圧 0.1MPa で 48 時間注入した後、再び 49kPa/min で載荷すると破碎圧力は 1.5MPa まで回復した。

さらに、ケース 3 として一定圧力を維持する一定水圧載荷実験を行った。49kPa/min の一定速度で載荷して破碎したところ、水圧破碎圧力はおよそ 8MPa であった。本ケースでは同様の載荷速度で破碎圧力の 8 割 (6.4Mpa) に到達したところで圧力を一定に保った。この圧力は本供試体の膨潤圧力（約 0.5~1MPa）よりもかなり高い圧力である。そして、約 6 時間後に AE ヒット数が急増し、圧力が低下し破碎が発生した。

ケース 1 およびケース 2 の結果から、一度破碎した供試体が元の強度まで膨潤によって回復するためには十分な浸潤が必要であり、それは低圧では非常に時間がかかる可能性があることがわかる。そして、回復しても元の強度まであり、初期状態以上に強くなることはない。

ケース 2 では AE 観測も行っており、1 回目の破碎で観測された AE の振幅は約 70dB まで上がったのに対し、2 回目、3 回目では 55dB 以下の AE しか観測されなかった。これは、1 回目の破碎は亀裂発生のために大きなエネルギーが発散されたのに対し、2, 3 回目では一度閉じた亀裂をもう一度開くだけであったので小さなエネルギーしか発散されなかつたためと推察される。

さらに、ケース 3 の結果から、破碎圧力より小さいが膨潤圧力より大きな圧力が作用した場合には、浸潤による強度低下の影響が強くなり、破碎に至ることがわかった。ケース 2 と同じ材料を用いた別の実験では、飽和度が 100% の場合の水圧破碎圧力は 50% の場合の 6 割程度であった。この結果からも緩衝材は飽和度が上昇すると強度が低下することがわかる。

以上の実験結果より、緩衝材の損傷→含水比上昇→膨潤→自己修復のシナリオについて、次のことがわかった。

- (1) 一度破碎した場合、亀裂が膨潤によって回復するには、十分に浸潤することが必要であり、低水圧の場合は多大な時間を要する。
- (2) また、回復しても元の強度以上にはならない。

- (3) 膨潤圧以上の圧力が長時間載荷されると、強度の低下により（飽和供試体の破碎圧力は飽和度50%の場合6割程度）破碎する可能性がある。

以上の結果より、設置時の強度をかなり高くしておかないと、緩衝材に局所的に高水圧が作用した場合に緩衝材が破碎する可能性は極めて高いと推察される。

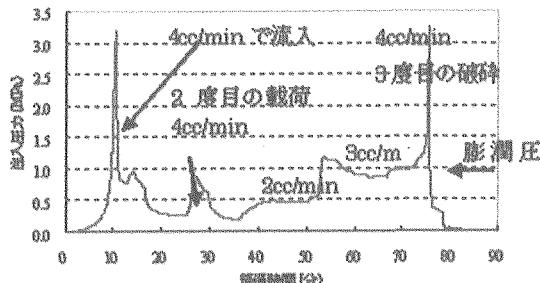


図1 ケース1の注入圧力の経時変化

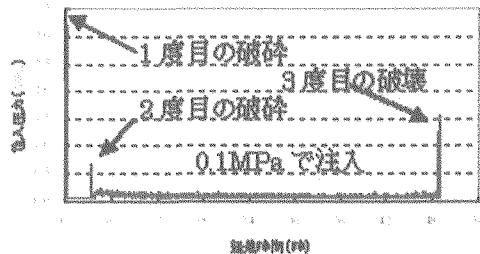


図2 ケース2の注入圧力と注入量の経時変化

2. 岩盤の水圧破碎基準

岩盤の水圧破碎モデルを連続体モデルで作成した。その際、岩盤の大きな引張強度を考慮するために図-3のようなモデルを用いた。ここでは、内部状態変数 b を考慮し Cam-clay モデルの降伏曲面を修正した。そして b を簡潔に岩石材料の引張強度と仮定した。本モデルは15年度に行った破壊力学による解析とも整合がとれ、現象の再現性を検証したものである。これに297種類の岩盤材料の Cam-clay パラメータを用いて、破壊基準の作成をまず行った。岩盤の水圧破碎の破壊基準としては、岩盤の強度（限界状態パラメーター）、透水係数と水圧上昇速度の比、水圧破碎圧力と土被り圧力の比をパラメーターとした。そして、その基準をダム基礎の水圧破碎で決壊したティートンダムの状況に応用し、その適用性を確認した。しかし、その基準は実際の実験結果を用いたものであるので、岩盤（亀裂などを含む）の破壊基準を作成するために岩盤等級に基づいてパラメータを決定して、岩盤の破壊基準の作成を行った。その結果を図-4に示す。

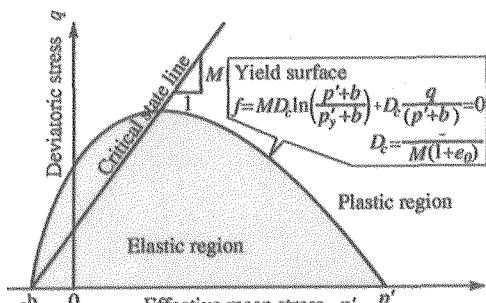
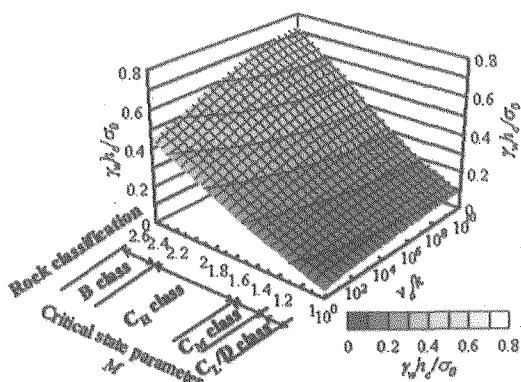
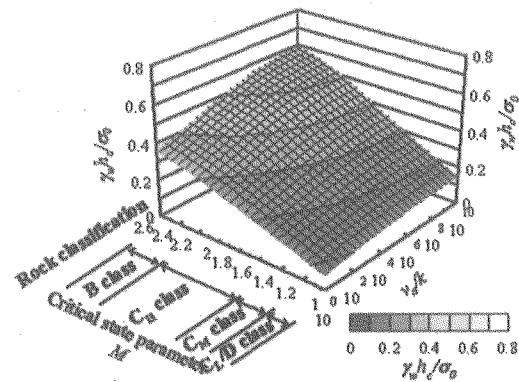


図-3 拡張した構成則モデル



(a) Revised criterion for tensile failure



(b) Revised criterion for shear failure

図-4 岩盤等級から推定したパラメーターを用いた岩盤の水圧破碎基準

この図-4の結果は先述の297種類の岩石試験結果の基準よりも小さい圧力で破碎する傾向が大きいため、保守側の基準となっている。

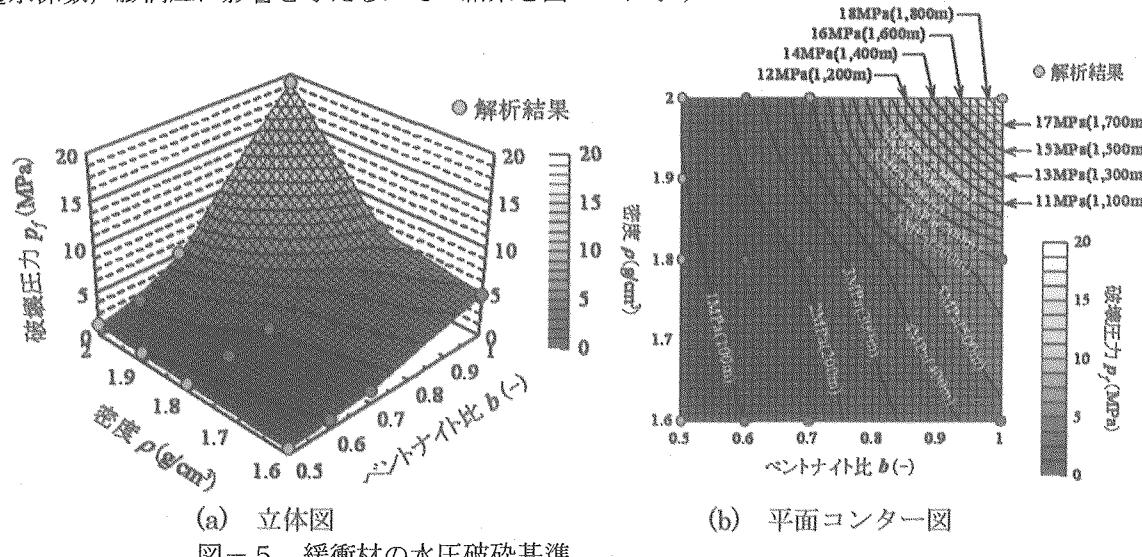
3. 緩衝材の水圧破碎基準

緩衝材水圧破碎実験の結果をまとめると以下のようである。

- 初期乾燥密度が大きく、初期含水比が小さいほど供試体の剛性が大きいので水圧破碎圧力は大きくなる。
- ケイ砂混合率が小さいほど間隙比が小さく、水が浸潤しにくいため破碎圧力は大きくなる。
- 水圧載荷速度と破碎圧力の関係には、含水比や膨潤圧が影響を与えていると考えられる
- 小さい圧力で破壊する場合は、破壊は局所的に起こる（せん断破壊と引張破壊の混合）
- 大きな圧力で破壊する場合は、破壊は供試体全体で起こり、引張破壊が主となる
- 拘束が弱い場合は、破壊は弱部まで伝達した後、弱部に沿って起こる
- 一度破碎した場合、亀裂が膨潤によって回復するには、十分に浸潤することが必要であり、低水圧の場合、多大な時間を要する。また、回復しても元の強度以上にはならない
- 膨潤圧以上の圧力が長時間載荷されると、強度の低下により（飽和供試体の破壊圧力は飽和度50%の場合の6割程度）破碎する可能性がある

これらの傾向を概ね再現できるモデルを構築することを試みた。しかし、パラメーターの非線形性が極めて複雑であり、個々のパラメーターの特性を他の実験によって確認することは難しいので、数値解析によりパラメーターの非線形の程度を調節して、水圧破碎実験を再現できるようにした。モデルは水一土連成モデルで、水の移動に関しては非線形水分拡散モデルを用い、膨潤に関しては飽和度の関数として与えた。また、実際の破壊水圧と要素の破壊時の水圧が異なるため最も水圧載荷境界に近い要素が破壊基準に到達したときの水圧から破壊水圧を推定する手法を取った。そして、破壊基準には飽和時供試体の試験結果を用いて、引張強度、せん断強度の両方から判定した。

水圧破碎の破壊基準のパラメーターとしては、緩衝材の密度、ベントナイト混合比を用いて、水圧破壊圧力を整理した。緩衝材の密度は強度と膨潤圧に影響を与え、ベントナイト混合比は強度、透水係数、膨潤圧に影響を与える。その結果を図-5に示す。



4. まとめ

岩盤の水圧破碎基準

- 1) モデルの検証をモルタル供試体を用いて行った。その結果、本解析で用いたモデルは岩盤破碎の現象をよく再現できることが分かった。
- 2) 既往の297種類の岩石の実験結果からパラメーターを決め、検証されたモデルを用いて破壊基準を作成し、より安全側となる岩盤分類を用いた破壊基準を作成した。

緩衝材の水圧破碎基準

- 1) 各種の条件の緩衝材を用いた水圧破碎実験より強度の傾向を把握した。
- 2) CTスキャン、AE測定により破壊形態を観測し、強度が低い場合にはせん断破壊も生じることがわかった。
- 3) 実験結果を用いたモデルの作成を行い、緩衝材の水圧破碎規準を作成した。

緩衝材の水圧破碎基準

- 1)種々の条件の緩衝材を用いた水圧破碎実験より強度の傾向を把握した。
- 2)CT スキャン、AE 測定により破壊形態を観測し、強度が低い場合にはせん断破壊も生じることがわかった。
- 3)実験結果を用いたモデルの作成を行い、緩衝材の水圧破碎規準を作成した。

【成果の反映状況】

本研究で得られた研究成果は、サイト選定における地質の差別化の要因として使用できることが期待される。地山強度比は施工法の策定上、重要な指標であり、本破壊基準は、処分後の安定性を評価する上の一つの大きな指標となる。

また、緩衝材の破壊基準は、緩衝材の仕様を決めるのに有用である。設計上の概念で早い時期に緩衝材を飽和させ、オーバーパック腐食の不確実性を減少させるという選択をするのであれば、本破壊基準を用いて破壊する時期（破碎圧力と地山透水係数から大体わかる）にあわせた配合を考えることが可能となる。あるいは、モニタリングにおいて、緩衝材中の飽和度変化が浸透計算と異なった計測がなされたときの重要な現象判断基準にもなる。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- Shen B., Stephansson O., Rinne M., Lee H-S. & Kobayashi A. (2004), FRACOD for continuum, discontinuum and fracture modeling of rocks, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert (ed.)
- 塚田泰博・小林晃・山本清仁・青山咸康・Stephansson O.・川上 進：“破壊力学による処分孔周辺岩盤の水圧破碎解析” 土木学会第 59 回年次学術講演会講演要旨集, pp.3,4, 2004
- 桃木 昌平・小林晃・山本 清仁・青山咸康・川上 進・棚井 憲治・菊池 広人：“CT撮影による緩衝材の水理破碎実験の内部破壊状態の観察”、土木学会第 59 回年次学術講演会講演要旨集, pp.113,114, 2004
- 桃木 昌平・小林晃・塚田泰博・山本清仁・青山咸康・藤田朝雄：“高レベル放射性廃棄物処分の緩衝材の水理破碎実験－その 1：実験とその結果－”、第 39 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1205,1206, 2004
- 塚田泰博高・小林晃・青山咸康・桃木 昌平・藤田朝雄：“レベル放射性廃棄物処分の緩衝材の水理破碎実験－その 2 解析に関する基礎的検討－”、第 39 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1207,1208, 2004
- Kobayashi A., Tsukada Y., Aoyama S., Kawakami S., Stephansson O. & Hee-Suk Lee (2004): Numerical analysis of hydraulic fracturing test by fracture mechanics and continuum mechanics, pp.457-462, Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Ohnishi & Aoki(eds)