

平成22年4月1日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2006～2009  
 課題番号：18206095  
 研究課題名（和文） 大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の研究開発に関する炉物理の共同研究  
 研究課題名（英文） Joint Study on Reactor Physics for Research and Development of Light Water Reactors of Next Generation between Japanese University Association and Commissariat à l'Énergie Atomique of France  
 研究代表者  
 代谷 誠治（SHIROYA SEIJI）  
 京都大学・原子炉実験所・教授  
 研究者番号：80027474

研究成果の概要（和文）：京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)で共同利用研究を行う日本の大学連合(JUA)とフランス原子力庁(CEA)とが研究協力協定に基づき、次世代型軽水炉等の炉物理に関する研究開発を双方で独自に推進しつつ、日仏セミナーを開催して研究成果を交流する中で適宜共通のテーマを設定する形で共同研究を行い、核計算と炉物理実験手法の高度化を図った。その結果、中性子の共鳴吸収反応の取扱い、超ウラン元素の核データ評価、各種反応率分布測定や未臨界度測定等々における精度が向上した。

研究成果の概要（英文）：A cooperative research between the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) and the Japanese University Association (JUA) involved in the joint use program of the Kyoto University Critical Assembly (KUCA) was conducted to promote the study on reactor physics for the research and development of light-water reactor of next generation based on the cooperation agreement. Based on the promotion of individual activities, common theme aiming at upgrading methodologies for neutronics calculation and reactor physics experiment was settled through the information exchange in Japan-France seminar. As a result, improvement of the accuracy was realized in the treatment of resonance absorption, the evaluation of nuclear data of transuranic elements, the measurement of reaction rate distribution, the measurement of subcriticality, and so on.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2007年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
総計	38,100,000	11,430,000	49,530,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子炉物理、計算手法、実験手法、高度化、次世代原子炉、軽水炉、研究開発、国際共同研究

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国の総発電電力量の 1/3 程度を原子力が占める時代となっているが、現行軽水炉の利用を続けるとすればウラン資源の可採年数は 80 年強に過ぎないと言われている。ウラン燃料を原子炉中で燃焼させることによって生じるプルトニウムを利用すれば、ウラン資源を 100 倍以上も有効に活用し得る可能性があることから、フランスや我が国では高速増殖炉の利用に移行する政策を採用して同炉の開発を進めていた。ところが、高速増殖炉の開発に遅滞が生じており、軽水炉を利用する時代がかなり長期間継続するものと予想されていた。

(2) このような状況の下で、核兵器への転用が懸念されるプルトニウムのストックが世界的にも増加しており、軽水炉用にプルトニウムをウランに混入した混合酸化物燃料としてリサイクル利用するプルサーマル方式が世界の多くの国で採用されている。混合酸化物燃料を現行の軽水炉中で燃焼させると、使用済燃料中にはウラン燃料の燃焼時よりも遙かに多くの超長寿命で放射能毒性の強いマイナーアクチニドが蓄積する。その蓄積量はプルトニウム同位体の組成や燃料中のプルトニウム含有量に依存する。安全に安定して原子炉の運転を行うためには、マイナーアクチニドの炉心核特性に及ぼす影響を正確に把握しておくことが必要となる。また、核燃料の再処理を行うためには、使用済燃料中に蓄積したマイナーアクチニドの量と組成が予測できることが望ましい。さらに、次世代の原子炉においては、プルトニウムの有効利用と同時にマイナーアクチニドの核変換処理を実現することが課題となっていることから、これに必要な科学的基礎を確立することが求められていた。

(3) これまで、フランス原子力庁(CEA)では臨界集合体を用いた実験的研究を活用して炉物理研究を精力的に行ってきた。一方、日本でも京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の共同利用研究に参加する大学が「大学連合(JUA)」を組織し、KUCA 実験を織り交ぜながら次世代型原子炉開発に関連した基礎的な炉物理研究を進めてきた。CEA と JUA は、共に実験解析に基づく検証を重視しつつ、核計算手法の開発を行っている。CEA ではプルトニウムを用いた実験、KUCA ではウランを用いた実験がともに系統的に行われてきたことから、互いに相補的な関係が存在した。

(4) 以上のような状況の下で、プルトニウム利用に伴う炉物理上の諸課題を両者が共同して解決しようという意識が芽生え、CEA と JUA との間で平成 5 年に研究協力協定が締結され、プルトニウムの有効利用を図ることを目的に次世代型軽水炉の炉物理に関する共同研究が開始された。その後、研究協力協定を幾度か更新しつつ、共同研究が継続して行われることになった。この CEA と JUA の研究協力協定は平成 16 年度に期限切れを迎えることになっていたが、研究課題を再整理して継続する方向で両者が一致していた。

(5) 世界の原子力開発をリードする立場にある日仏両国が、次世代型軽水炉を始めとする次世代原子炉の開発に向けて、原子力利用の基盤となる炉物理に関する共同研究を行うことは意義深いと考えられた。

(6) なお、本研究は、平成 9～11 年度の基盤研究(A)(2)「次世代の炉物理に関する共同研究—次世代型軽水炉の炉物理—」(課題番号 09044163)、平成 12～15 年度の基盤研究(A)(1)「大学連合による次世代型軽水炉の炉物理に関する研究—フランス原子力庁との共同研究—」(課題番号 12308025)、平成 15～18 年度の基盤研究(A)「大学連合とフランス原子力庁による次世代型軽水炉の物理に関する共同研究」(課題番号 15206113)の成果に基づいて行うものと位置づけられていた。

## 2. 研究の目的

原子力利用については、「第 4 世代の原子炉」とも言われる次世代型原子炉に関する研究開発を進めつつ、軽水炉時代の長期化に対応するという動きが国際的には主流になっており、軽水炉の改良が継続的に進められている。この中で、プルサーマルに見られるようにプルトニウムの軽水炉における利用、核燃料増殖を含むウラン資源の有効利用、核廃棄物の処理の一端を担うマイナーアクチニドの核変換処理等々が課題となっている。そして、これらを視野に入れた次世代型軽水炉を始め、種々の革新的概念に基づく次世代型原子炉の開発が望まれている。

本研究は、CEA と JUA の研究協力協定に基づく共同研究の推進を軸に、次世代型軽水炉を始めとする次世代型原子炉の開発に必要な炉物理を確立すべく、核計算手法と炉物理実験手法の高度化を図ることを目的として行うものである。

## 3. 研究の方法

本研究は、CEA と JUA の研究協力協定に基づく共同研究の推進を軸に行うものであり、従来の協定の枠組みを継続しつつ、研究の進展に応じて研究課題を再整理することを基本とし、新たに5年間の研究協力協定を締結するために作業を行うこととした。共同研究の目標は、核計算手法及び炉物理実験手法のより一層の高度化を図り、次世代型軽水炉を始めとする次世代型原子炉の開発に必要な炉物理を確立することである。

具体的な研究課題としては、

- (1) 共鳴干渉を含む自己遮蔽計算法の開発及び検討
- (2) 燃焼及びドップラー反応度計算におけるリム効果及び径方向温度分布を考慮した計算法の開発と検討
- (3) 燃料格子の感度係数計算法の開発及び検討並びに誤差伝播の検討
- (4) マイナーアクチニドを含む超ウラン元素のリサイクルを行うために必要な炉物理の確立
- (5) 格子計算時の漏洩評価モデルの開発及び検討並びに検証
- (6) 炉物理実験手法の高度化

が設定された。なお、上記(3)と(5)は双方が長期的な取り組みが必要な課題であるとの認識を持っていることから、本研究期間中については研究対象から除外することとした。

上記(1)と(2)はプルトニウムの利用に伴って炉心核特性に及ぼす影響が増大あるいは変化している中性子の共鳴吸収効果計算法、温度反応度係数等の計算法の高度化に関するものである。上記(4)はプルトニウムの燃焼に伴って炉心核特性に及ぼす影響が増大するマイナーアクチニドの蓄積量等を評価する上で必要な計算手法の高度化に関するものである。上記(6)は次世代型軽水炉を始めとする次世代型原子炉の研究開発に使用される核計算の検証に必要な実験データの取得にあたって用いる炉物理実験技術等の高度化に関するものである。

これらについて、日仏の双方で独自に研究を推進することを基本とし、日仏セミナーあるいは日仏技術会合を原則として毎年1回以上、日仏で交互に開催し、双方の研究成果に関する発表・討論を通じて情報を交換しながら進めることとした。これにより、日仏ともに実際に計算や実験に従事した研究者の参加が容易になり、より詳細な情報の交換が可能となる。また、共通の研究課題を発掘し、双方の役割分担を定め、双方が異なった角度からアプローチして得た成果をつき合わせる事が可能となることから、研究成果の信頼性が向上するとともに、日仏双方における研究の進展に役立つ。

本研究期間における共同研究については、

- 1) 核計算法の高度化では日仏双方がそれぞ

れ独自に研究を行うとともに、ベンチマーク的な課題を選定して双方で開発した計算手法を用いて求めた結果を比較・検討する方法を採用し、2) 実験手法の高度化については、双方で推進している実験プロジェクトで開発した技術の成果を持ち寄って討議を行い、双方の経験に基づく助言を行って実験データの質の向上を図る取り組みに役立てることとした。具体的には、核計算については、ウラン燃料炉心及び混合酸化物燃料炉心に関する実験結果の解析、及び温度反応度係数の計算、燃料の照射後試験の解析等を重点的に取り上げて双方の結果を比較・検討することとした。炉物理実験については、CEA では混合酸化物燃料を用いる沸騰水型軽水炉に関するプロジェクト等が行われ、KUCA では加速器駆動未臨界炉に関するプロジェクト等が行われていることから、双方がそれぞれの実験の中で開発した実験技術を取り上げて討議を行うこととした。

#### 4. 研究成果

本研究の遂行に不可欠なCEAとJUAの研究協力協定については、研究担当者間では本研究が始まる前に既に合意が形成されており、共同研究も実質的には継続して行われていたことから、研究遂行上で重大な問題の発生には至らなかったが、フランス側における事務的な手続きに時間を要したため、平成20年10月末に締結された。

日仏セミナーについては、上述のように研究協力協定の締結が遅れたことから、平成20年10月末の協定締結時にフランスCEAサックレー研究所で開催し、共同研究課題に関する発表・討論を行った。なお、協定の空白期間における研究情報の交換等については、メールあるいは国際会議等の機会を利用して行われた。また、平成22年3月には京都大学原子炉実験所で日仏セミナーを発展させた炉物理実験国際シンポジウムを開催し、炉物理実験の精度向上等の高度化を図った研究成果を中心に本共同研究に参画する研究者のみならず、米国、韓国、スウェーデン、セルビアの研究者を交えて発表・討論を行った。これにより、核計算手法の高度化と炉物理実験手法の高度化が互いに密接な関連を有するものであることが再認識されるとともに、次世代型原子炉の開発に向けた炉物理研究を推進する上で不可欠な炉物理実験技術のさらなる高度化に向けた貴重な情報を関連研究者が共有することとなった。なお、この国際シンポジウムには国内から学生を含む若手が多数参加して積極的に討論に加わったことから、今後の炉物理研究の進展が期待できるものと考えている。

本研究を通じて、決定論的手法に基づく核

計算における中性子の共鳴吸収反応の精緻な取扱法が日仏双方で開発されるなどの成果が挙げられ、核計算の精度が向上した。また、これらの核計算法を用いた実験解析の結果は、超ウラン元素等の核データの評価にフィードバックされ、核データの質の向上に貢献した。一方、炉物理実験については、京都大学原子炉実験所において平成21年3月に世界初の核破砕中性子を用いた加速器駆動未臨界炉実験が実施され、その1年後には高エネルギー陽子加速器の性能を約1桁向上させることに成功してトリウム燃料体系を用いた加速器駆動未臨界炉実験が行われ、次世代の革新的な原子炉の開発に向けた貴重なデータが取得された。なお、このような実験を実施する中で未臨界度測定法、各種の反応率分布測定法、炉心内中性子スペクトル測定法等々における実験手法の高度化が図られ、実験データの精度向上が達成された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Cheol Ho PYEON, Yoshiyuki HIRANO, Tsuyoshi MISAWA, Hironobu UNESAKI, Chihiro ICHIHARA, Tomohiko IWASAKI and Seiji SHIROYA  
Preliminary Experiments on Accelerator-Driven Subcritical Reactor with Pulsed Neutron Generator in Kyoto University Critical Assembly  
J. Nucl. Sci. Technol., 査読有、Vol. 44, No. 11, 2007, pp. 1368-1378
- ② Cheol Ho PYEON, Morgan HERVAULT, Tsuyoshi MISAWA, Hironobu UNESAKI, Tomohiko IWASAKI and Seiji SHIROYA  
Static and Kinetic Experiments on Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons in Kyoto University Critical Assembly  
J. Nucl. Sci. Technol., 査読有、Vol. 45, No. 11, 2008, pp. 1171-1182
- ③ Cheol Ho Pyeon, Hiroshi SHIGA, Tsuyoshi MISAWA, Tomohiko IWASAKI and Seiji SHIROYA  
Reaction Rate Analyses for an Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons in the Kyoto University Critical Assembly  
J. Nucl. Sci. Technol., 査読有、Vol. 46, No. 10, 2009, pp. 965-972
- ④ Cheol Ho PYEON, Tsuyoshi MISAWA, Jae-Yong LIM, Hironobu UNESAKI, Yoshihiro ISHI, Yasutoshi KURIYAMA, Tomonori UESUGI, Yoshiharu MORI, Makoto INOUE, Ken NAKAJIMA, Kaichiro

MISHIMA and Seiji SHIROYA

First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical Assembly  
J. Nucl. Sci. Technol., 査読有、Vol. 46, No. 12, 2009, pp. 1091-1093

- ⑤ Hesham SHAHBUNDER, Cheol Ho PYEON, Tsuyoshi MISAWA, and Seiji SHIROYA  
Experimental Analysis for Neutron Multiplication by Using Reaction Rate Distribution in Accelerator-Driven System  
Ann. Nucl. Energy, 査読有、Vol. 37, No. 4, 2010, pp. 592-597
- ⑥ Hiroshi TANINAKA, Kengo HASHIMOTO, Cheol Ho PYEON, Tadafumi SANNO, Tsuyoshi MISAWA and Takaaki OHSAWA  
Determination of Lambda-Mode Eigenvalue Separation of a Thermal Accelerator-Driven System from Pulsed Neutron Experiment  
J. Nucl. Sci. Technol., 査読有、Vol. 47, No. 4, 2010, pp. 376-383

[学会発表] (計43件)

- ① Cheol Ho PYEON, Tsuyoshi MISAWA, Hironobu UNESAKI and Seiji SHIROYA  
Present State of Accelerator Driven Subcritical Reactor (ADSR) Project in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)  
Proc. PHYSOR 2006, ANS Topical Meeting on Reactor Physics, Sep.10-14, 2006, Vancouver, Canada
- ② Cheol Ho PYEON  
Benchmark Experiments of Accelerator Driven Systems (ADS) in Kyoto University Critical Assembly (KUCA)  
5-th Int. Workshop on the Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, May 9, 2007, Mol, Belgium
- ③ Cheol Ho PYEON, Hiroshi SHIGA, Kazuaki ABE, Hiroshi YASHIMA, Tsuyoshi MISAWA, Tomohiko IWASAKI, Seiji SHIROYA  
Neutron Spectrum Analyses by Foil Activation Method for High-Energy Proton Beam  
13th Int. Symposium on Reactor Dosimetry, May 29, 2008, Alkmaar, the Netherlands
- ④ Cheol Ho PYEON, Jae Yong LIM, Tsuyoshi MISAWA and Seiji SHIROYA  
Current Status of Accelerator-Driven System with High-Energy Protons in Kyoto University Critical Assembly  
Winter Mtg. of American Nucl. Soc. Nov. 18, 2009, Washington, USA

[その他]

ホームページ等

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/index/kenkyu.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

代谷 誠治 (SHIROYA SEIJI)  
京都大学・原子炉実験所・教授  
研究者番号：80027474

### (2) 研究分担者

三澤 毅 (MISAWA TSUYOSHI)  
京都大学・原子炉実験所・准教授  
研究者番号：70219616  
卞 哲浩 (PYEON CHEOLHO)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：50362143

### (3) 連携研究者

宇根崎 博信 (UNESAKI HIRONOBU)  
京都大学・原子炉実験所・教授  
研究者番号：40213467  
中島 健 (NAKAJIMA KEN)  
京都大学・原子炉実験所・教授  
研究者番号：60355047  
竹田 敏一 (TAKEDA TOSHIKAZU)  
福井大学・国際原子力研究所・教授  
研究者番号：30116058  
北田 孝典 (KITADA TAKANORI)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：60263208  
山根 義宏 (YAMANE YOSHIHIRO)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60115649  
山本 章夫 (YAMAMOTO AKIO)  
名古屋大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：50362265  
北村 康則 (KITAMURA YASUNORI)  
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学  
研究部門・副主任研究員  
研究者番号：60332706  
橋本 憲吾 (HASHIMOTO KENGO)  
近畿大学・原子力研究所・教授  
研究者番号：70218410  
岩崎 智彦 (IWASAKI TOMOHIKO)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：70184869  
島津 洋一郎 (SIMAZU YOICHIRO)  
北海道大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60312378  
堀 順一 (HORI JUNICHI)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：30362411  
佐野 忠史 (SANO TADAHUMI)  
京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：10523152

林 栽瑢 (LIM JAE-YONG)

京都大学・原子炉実験所・特定助教

研究者番号：50544003