



JAEA-Technology

2009-062

## ウランモリブデン（U-Mo）燃料調査報告書 (2008 年度)

U-Mo Fuel Research Working Group Report (FY2008)

試験炉・研究炉用燃料核燃料対策委員会  
ウランモリブデン（U-Mo）燃料調査分科会

U-Mo Fuel Research Working Group

January 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

## ウランモリブデン（U-Mo）燃料調査報告書 (2008年度)

日本原子力研究開発機構  
試験炉・研究炉用燃料核燃料対策委員会  
ウランモリブデン（U-Mo）燃料調査分科会

(2009年11月13日 受理)

試験研究炉 JRR-3、JRR-4 及び JMTR では、 $^{235}\text{U}$  の濃縮度が 20%未満のシリサイド燃料を使用している。各炉で使用済となったシリサイド燃料は、2016 年 5 月までに炉心から取り出されたものに限り、米国エネルギー省が引き取る契約を締結しているが、それ以降に炉心から取り出され使用済となったシリサイド燃料は、各施設内に保管せざるを得ない状況になる。そのため、シリサイド燃料の後継燃料として、再処理性が良いと報告されているウランモリブデン（U-Mo）燃料について、試験研究炉への採用の可否の検討を行った。

本調査から、ウランモリブデン（U-Mo）燃料の再処理性については、軽水炉燃料溶解液による希釈を行うことにより可能であることが明らかになった。しかし、照射による燃料のスウェーリングの問題は解決されておらず、現在のところ、試験研究炉用の燃料として採用を決定できる段階にないことが分かった。

**U-Mo Fuel Research Working Group Report  
(FY2008)**

**U-Mo Fuel Research Working Group**

**Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken**

**(Received November 13, 2009)**

A silicide fuel enriched less than 20%  $^{235}\text{U}$  has been used for research reactors JRR-3, JRR-4 and JMTR. The spent silicide fuel elements generated before May 2016 will be shipped to the United States under the contract between the United States Department of Energy (DOE) and the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). After termination of the contract, the spent silicide fuel elements will have to be staged in each facility. Therefore, we have reviewed possibilities of using U-Mo fuel which may have good reprocessing feasibility as alternative fuel to the silicide fuel.

We have confirmed that the reprocessing of U-Mo is possible by means of dissolving it in fuel of light water reactor. However, we have confirmed swelling problems of U-Mo fuel are not solved. Therefore, we have decided that the conversion from silicide fuel to U-Mo fuel is not possible at present.

**Keywords : U-Mo, LEU, Nonproliferation, Research Reactor, Silicide Fuel**

## 目 次

|   |    |
|---|----|
| 1. はじめに .....                             | 1  |
| 2. U-Mo 燃料について .....                      | 1  |
| 3. 海外における U-Mo 燃料開発の現状 .....              | 3  |
| 3.1 米国 RERTR プログラムの状況 .....               | 3  |
| 3.2 仏国 U-Mo グループによる開発の状況 .....            | 7  |
| 3.3 その他の国の動向 .....                        | 10 |
| 3.4 燃料製作メーカー（CERCA 社）からの技術情報 .....        | 11 |
| 3.5 U-Mo 分散型燃料におけるスウェーリング対策 .....         | 11 |
| 3.6 海外の U-Mo 燃料の採用状況 .....                | 11 |
| 4. U-Mo 燃料への移行のスケジュール .....               | 12 |
| 5. U-Mo 燃料移行時の安全審査等で必要なデータの検討 .....       | 15 |
| 5.1 方針 .....                              | 15 |
| 5.2 U-Mo 燃料移行時の安全審査等で必要なデータの検討 .....      | 15 |
| 5.3 まとめ .....                             | 16 |
| 6. 照射計画の検討 .....                          | 21 |
| 6.1 照射キャプセルの設計 .....                      | 21 |
| 6.2 照射期間の検討 .....                         | 22 |
| 7. 照射後試験の検討 .....                         | 22 |
| 7.1 照射後試験項目 .....                         | 22 |
| 7.2 照射試料の寸法と数 .....                       | 24 |
| 7.3 照射後試験の実施に当たっての問題点 .....               | 25 |
| 8. 再処理性 .....                             | 28 |
| 8.1 U-Mo 燃料再処理 .....                      | 28 |
| 8.2 U-Mo-Si 燃料再処理 .....                   | 29 |
| 8.3 U-Mo 燃料加工スクラップ回収 .....                | 29 |
| 8.4 U-Mo 燃料の再処理施設 .....                   | 29 |
| 8.5 再処理性のまとめ .....                        | 30 |
| 9. まとめ .....                              | 30 |
| 謝辞 .....                                  | 32 |
| 参考文献 .....                                | 32 |
| 付録 I 2008 年度 U-Mo 燃料調査分科会委員名簿及び開催状況 ..... | 33 |
| 付録 II 2003 年度 U-Mo 燃料アドホック検討会委員名簿 .....   | 34 |
| 付録 III JRR-3 用 U-Mo 燃料仕様の検討 .....         | 35 |
| 付録 IV JMTR 用 U-Mo 燃料仕様の検討 .....           | 44 |
| 付録 V JRR-3 において照射試験を実施する場合の照射計画の検討 .....  | 53 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction .....   | 1  |
| 2. Description of U-Mo fuel.....  | 1  |
| 3. Development of U-Mo fuel in foreign countries .....                                | 3  |
| 3.1 Development status of RERTR program in the United State .....                     | 3  |
| 3.2 Development status of French U-Mo group .....                                     | 7  |
| 3.3 Currnet status of other countries .....   | 10 |
| 3.4 Technical information from fuel fabricator (CERCA) .....                          | 11 |
| 3.5 Measures for swelling of U-Mo fuel .....  | 11 |
| 3.6 Acceptance status of U-Mo fuel .....  | 11 |
| 4. Schedule of conversion to U-Mo fuel .....  | 12 |
| 5. Investigation of necessary data for safety review on conversion to U-Mo fuel ..... | 15 |
| 5.1 Policy .....  | 15 |
| 5.2 Investigation of necessary data for safty review on conversion to U-Mo fuel.....  | 15 |
| 5.3 Summary of necessary data for safety review.....                                  | 16 |
| 6. Investigation of irradiation examination .....                                     | 21 |
| 6.1 Design of irradiation capsule.....  | 21 |
| 6.2 Investiation of irradiation time .....  | 22 |
| 7. Investigation of post irradiation examination .....                                | 22 |
| 7.1 Contents of post irradiation examination .....                                    | 22 |
| 7.2 Sample specification of post irradiation examination .....                        | 24 |
| 7.3 Problems of post irradiation examination .....                                    | 25 |
| 8. Reprocessing feasibility .....   | 28 |
| 8.1 Reprocessing of U-Mo fuel .....   | 28 |
| 8.2 Reprocessing of U-Mo-Si .....   | 29 |
| 8.3 Scrap recovery operations of U-Mo fuel .....                                      | 29 |
| 8.4 Reprocessing plant of U-Mo fuel.....  | 29 |
| 8.5 Summary of U-Mo fuel reprocessing .....   | 30 |
| 9. Summary .....  | 30 |
| Acknowledgments.....  | 32 |
| References.....   | 32 |
| Appendix I Participant list and schedule of U-Mo fuel working group 2008.....         | 33 |
| Appendix II Participant list of U-Mo fuel ad-hoc working group 2003 .....             | 34 |
| Appendix III Investigation of U-Mo fuel spcifications for JRR-3 .....                 | 35 |
| Appendix IV Investigation of U-Mo fuel spcifications for JMTR .....                   | 44 |
| Appendix V Invesitigation of irradiation examination at JRR-3 .....                   | 53 |

試験炉・研究炉用燃料核燃料対策委員会  
ウランモリブデン（U-Mo）燃料調査分科会

加藤 友章<sup>\*1</sup>・堀口 洋徳<sup>\*1</sup>・那珂 通裕<sup>\*2</sup>・和田 茂<sup>\*1</sup>・天谷 政樹<sup>\*3</sup>・塙 信広<sup>\*2</sup>・菊池 博之<sup>\*4</sup>  
山本 和喜<sup>\*5</sup>・内山 軍蔵<sup>\*3</sup>・更田 豊志<sup>\*3</sup>・村山 洋二<sup>\*6</sup>・井上 猛<sup>\*7</sup>・寺門 義文<sup>\*1</sup>・山下 清信<sup>\*1</sup>

\*1 東海研究開発センター原子力科学研究所研究炉加速器管理部

\*2 大洗研究開発センター照射試験炉センター原子炉施設管理部

\*3 安全研究センター

\*4 東海研究開発センター原子力科学研究所ホット試験施設管理部

\*5 原子力研修センター

\*6 経営企画部

\*7 核不拡散科学技術センター

Tomoaki KATO<sup>\*1</sup>, Hironori HORIGUCHI<sup>\*1</sup>, Michihiro NAKA<sup>\*2</sup>, Shigeru WADA<sup>\*1</sup>,  
Masaki AMAYA<sup>\*3</sup>, Nobuhiro HANAWA<sup>\*2</sup>, Hiroyuki KIKUCHI<sup>\*4</sup>, Kazuyoshi YAMAMOTO<sup>\*5</sup>,  
Gunzo UCHIYAMA<sup>\*3</sup>, Toyoshi FUKETA<sup>\*3</sup>, Yoji MURAYAMA<sup>\*6</sup>, Takeshi INOUE<sup>\*7</sup>,  
Yoshibumi TERAKADO<sup>\*1</sup> and Kiyonobu YAMASHITA<sup>\*1</sup>

\*1 Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center

\*2 Department of JMTR Operation, Neutron Irradiation and Testing Reactor Center, Oarai Research and Development Center

\*3 Nuclear Safety Research Center

\*4 Department of Hot Laboratories and Facilities, Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center

\*5 Nuclear Technology and Education Center

\*6 Policy Planning and Co-ordination Department

\*7 Nuclear Nonproliferation Science and Technology Center

This is a blank page.

## 1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「機構」という。）の所有する試験研究用原子炉（以下、「試験研究炉」という。）JRR-3、JRR-4 及び JMTR で使用しているシリサイド燃料（以下、「 $U_3Si_2$  燃料」という。）は、使用後は、米国エネルギー省（以下、「DOE」という。）により引き取られる契約を締結している。しかしながら、DOE による引き取りは、2016 年 5 月 13 日以前に原子炉から取り出された燃料に限ることが、DOE との契約書に記載されている。このため、 $U_3Si_2$  燃料を使用している試験研究炉の運転を今後も継続していくには、 $U_3Si_2$  燃料の代替燃料として、性能低下を招くことのない再処理可能な燃料について検討を実施する必要がある。

ウランモリブデン燃料（以下、「U-Mo 燃料」という。）は、 $U_3Si_2$  燃料に比べウランの高密度化が可能であり、再処理性も良いと言われ、世界でも米国、仏国を中心に開発が進められてきている。U-Mo 燃料は、2004 年に照射中に異常なスウェーリングが発生する等、未だ開発中の燃料ではあるが、将来、 $U_3Si_2$  燃料から移行する可能性もあり得ることから、予め、調査・検討を十分に行い、知見を集約しておくことは、将来の試験研究炉燃料の展望を得るために重要である。

のことから、機構の「試験・研究炉燃料対策委員会」の下に「U-Mo 燃料調査分科会」（2008 年 8 月設置）が設置され、U-Mo 燃料の採用の可能性、技術的問題点などについての検討を行うこととなった。

本報告書は、U-Mo 燃料調査分科会が 2008 年度に実施した、U-Mo 燃料の開発状況（製造技術、照射試験など）の調査、U-Mo 燃料の利点及び欠点の整理、安全審査時に必要なデータの検討、U-Mo 燃料の再処理性の調査等を、国際会議への参加、公表文献等の調査により行い、得られた結果等をまとめたものである。

なお、U-Mo 燃料に関する検討は、旧日本原子力研究所（以下、「旧原研」という。）においても「U-Mo 燃料アドホック検討委員会（2001 年 3 月設置）」にて行われた。本報告書の作成にあたっては、同委員会の報告書の内容を有効活用することとし、さらに、その後、明らかとなつた最新の知見を反映した報告書とすることとした。

## 2. U-Mo 燃料について

JRR-3、JRR-4 及び JMTR のような試験研究炉では、炉心の出力密度・中性子束を高めるため、当初は、ウラン濃縮度が 90% 程度の高濃縮ウラン燃料が使用されてきた。しかし核不拡散の観点から、ウラン濃縮度が 20% 未満の低濃縮ウラン燃料を使用することを目的とした RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors) が米国より提唱され、現在、試験研究炉では低濃縮の  $U_3Si_2$  燃料が使用されている。Fig.2-1 に JRR-3 及び JRR-4 で使用している  $U_3Si_2$  燃料を用いた燃料要素を示す。この  $U_3Si_2$  燃料は、 $U_3Si_2$  粒子を母材である Al 中に均一に分散させた燃料芯材を Al で両側から被覆した燃料板と呼ばれるものを 20 枚前後並べ

た構造であり、分散型板状燃料と呼ばれる。しかし、U-Mo 合金による U-Mo 燃料は、 $U_3Si_2$  燃料と比べて再処理性が良く、ウランの高密度化が図れるという理由から米国、仏国等を中心に開発が行われている。

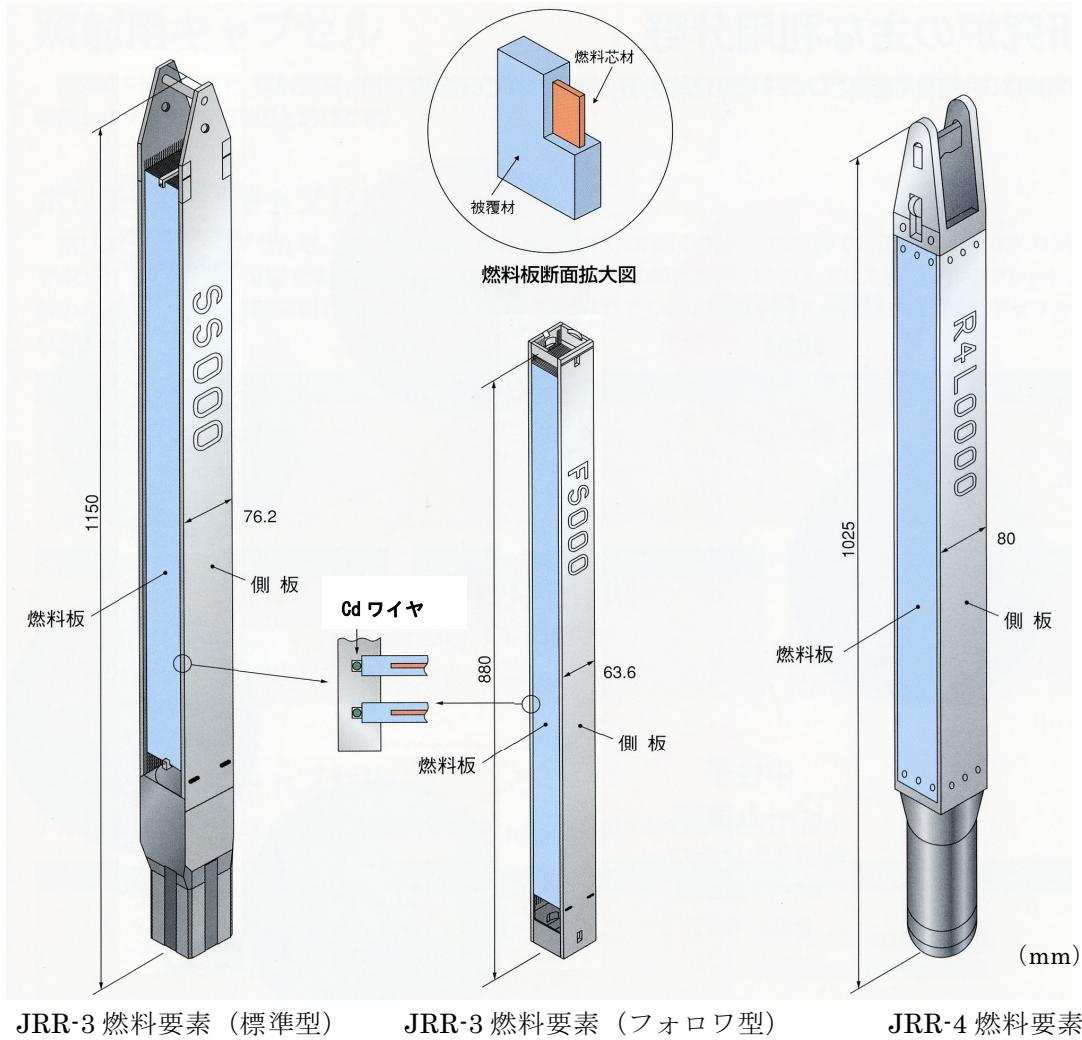


Fig.2-1 JRR-3 及び JRR-4 燃料要素

U-Mo 燃料の最近における典型的な仕様は、U-Mo 合金中の Mo 含有率が 6~10wt%、燃料芯材中のウラン密度は、分散型燃料では、 $U_3Si_2$  燃料より高く、6~8g/cm<sup>3</sup>程度である。高温時の相互作用の点で有利とされている U-Mo 合金の一枚板によるモノリス燃料では、さらに高く、16.4g/cm<sup>3</sup>程度である。U-Mo 合金の種類としては、U-Mo 二元系に加えて性能改善のため Ti、Zr 等を数%程度添加した U-Mo-Ti や U-Mo-Zr 等の三元系からなる合金等がある。また、分散型燃料における U-Mo 粒子の製造方法としては、U-Mo 合金を機械的に粉碎することで粒子を製造する機械的粉碎法や、過熱、溶解させた U-Mo 合金を、噴射、冷却させることによって球形に近い U-Mo 粒子を製造するアトマイズ法と呼ばれる方法等があり、その粒子の粒径も変えて試験が行われている。分散型燃料の母材の種類としては、Al 母材やスウェーリング対策として Si を添加した Al-Si 母材、または、Mg 母材等の改良型母材がある。さらに、被覆材の種類の

組み合わせも含めて多種多様な照射・照射後試験が行われている。

機構の所有する試験研究炉へ U-Mo 燃料を採用する場合の例として、JRR-3 及び JMTR において採用した場合の燃料仕様についての検討を実施した。JRR-3 において採用する場合、ウラン密度  $4.8 \text{ g/cm}^3$ 、ウラン濃縮度 19.75%とした U-Mo 燃料は、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料に比べて、1 体あたりの積算出力がわずかに減少するものの、同等の照射性能を得られる燃料となる見通しを得た。参考として、ウラン密度  $8.0 \text{ g/cm}^3$ 、ウラン濃縮度 15.90%とした U-Mo 燃料についても検討し、高密度の U-Mo 燃料は、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料に比べて 1 体あたりの積算出力を約 1.3 倍にできる燃料となる見通しを得た。JRR-3 において採用する場合の検討結果の詳細を付録IIIに示す。JMTR において採用する場合は、ウラン密度  $4.8 \text{ g/cm}^3$ 、ウラン濃縮度 19.75%とした U-Mo 燃料では、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料とほぼ同等の性能を得られる見通しを得た。JMTR において U-Mo 燃料を採用する場合の検討結果の詳細を付録IVに示す。

### 3. 海外における U-Mo 燃料開発の現状

2008 年 10 月に行われた Reduced Enrichment for Research Reactor (以下、「RERTR」という。) 会議等で報告された最近の U-Mo 燃料開発の概要は以下の通りである。

- (1) U-Mo 燃料としては、U-Mo 分散型燃料と U-Mo モノリス燃料の開発が進められている。
- (2) U-Mo 分散型燃料は、早期の実用化を目指しており、燃料の品質データを 2012 年以降に公開する予定である。よって、2013 年以降に NRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission) による確認報告が出される見込みである。
- (3) U-Mo モノリス燃料は  $16.4 \text{ g/cm}^3$  程度までのウラン密度が見込まれ、将来的に有望視されており、製造工程から照射実験に亘って開発されている状況である。

本会議では、仏国 U-Mo グループが、ウラン密度  $8 \text{ g/cm}^3$  の U-Mo 分散型燃料を用いて行っていた FUTURE 試験において発生した燃料の異常なスウェーリングの対策等の結果報告が行われた。今後の U-Mo 燃料開発計画に与える影響等について、情報を収集していく必要があるとされた。

近年に開催された会議、報告会等にて入手した海外における U-Mo 燃料開発の現状を以下に示す。

#### 3.1 米国 RERTR プログラムの状況

米国 RERTR においては、Table3-1 に示す照射試験が実施してきた。

RERTR-1 及び 2 では、高ウラン密度燃料の成立性について見通しを得るために、多種のウラン合金 (U-Nb-Zr 合金、U-Mo 二元系、U-Mo 三元系) を用いてミニプレートが製作された。照射後試験の結果、U-Nb-Zr 合金を用いた燃料板及び Mo 含有率の少ない U-4%Mo 合金は不適当であること、Mo 含有率が 6~10wt% の U-Mo 合金で優れた照射挙動が得られることが明らかとなった。Ru,Pt,Os 等を加えた三元系の U-Mo 合金については、二元系合金と比べて特段の改善が得られなかったとされている。RERTR-1 及び 2 は、低いウラン密度 ( $\sim 4 \text{ g/cm}^3$ )

の燃料を用いて、低温（最大被覆温度：～65°C）で照射が行われた。

RERTR-3 では、ウラン密度を高くした U-Mo 分散型燃料（～8.5g/cm<sup>3</sup>）を、高温（最大被覆温度：～150°C）、高熱流束（～390 W/cm<sup>2</sup>）で、約 40%燃焼度（<sup>235</sup>U 減損量を表した燃焼度。以下同じ。）まで照射した。Mo 含有率は、RERTR-1、2 の結果に基づき、6～10wt%とされた。照射後試験の結果、燃料スウェーリングは比較的小さく、破損の兆候は観察されず、燃料板は許容可能な性能が示された。しかし、燃料温度の高いものでは、燃料マトリックス反応が観察され、燃料中心部分にマトリックスが残っていない燃料板が見られた。

RERTR-4 及び 5 では、典型的な試験研究炉の運転条件を想定し、ウラン密度 6～8g/cm<sup>3</sup> の U-Mo 分散型燃料を用いて、燃焼度 50% 及び 80% までの照射が計画された。両試験の照射後試験は、次のような内容が報告されている。

- (1) 燃料のスウェーリング増加率は、U-Mo/Al 反応が終了するまでは温度とともに増加し、以降は、燃焼度のみの関数となる。
- (2) 燃料とマトリックスの反応は、従来想定されていた U-Al 反応よりも Mo-Al の反応が支配的であり、生成物は主に (U,Mo)Al<sub>7</sub> である。また、Al マトリックスがほぼ消費された時点では、反応層内には粗い多孔領域が観察される。この現象は、ブレークアウェイスウェーリング（U<sub>3</sub>Si や U<sub>3</sub>SiAl に見られるがちな過度のスウェーリングであり、また、ブリストラの原因となるものである。）の兆候と見られることから燃料性能の限界として着目される。照射後試験での U-Mo 燃料断面から大部分の核分裂生成ガス（以下、「FP ガス」という。）の特性を知ることができる。燃焼度 35%付近で FP ガスが初めて粒界に現れ、その後 40～50% では燃焼と共に FP ガスが粒界に増加し、そして結晶粒にも次第に FP ガスは広がりを見せ、スウェーリングも起こす。高燃焼度（80%）まで燃焼させると、最終的には、燃料全体に均一に FP ガスが広がっていることが明らかとなった。

また、RERTR-4 では、2 枚の U-Mo モノリス燃料のミニプレートが燃焼度 75% まで照射された。米国 RERTR は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料などを採用すると炉心特性が低下するため低濃縮化を拒んでいたが、U-Mo 分散型燃料では、炉心特性は高濃縮燃料を維持するため燃料の低濃縮化が可能であり、また、高温時の燃料とマトリックスの相互作用を緩和できる可能性のある U-Mo モノリス燃料の開発を分散型燃料と平行して進めている。

RERTR-6 では、RERTR-4 及び 5、FUTURE、IRIS2 等の照射後試験で沢山の多孔領域が観察されたため、その対策として母材に Si を添加する試みがなされた。このプログラムでの目的は、改良型母材の性能評価と初めて行われるモノリス燃料の照射試験である。実験設備は 4 つのキャプセルで構成され、各々に 8 枚収納した。2005 年 5 月に ATR 原子炉の B-12 孔に実験設備を装荷し、3 サイクル 135 日照射した。その結果、平均燃焼度は 35～49% であった。Si 添加量は 0.2%～4.8% とし、照射後試験結果、2% と 4.8% の Si を添加した燃料マトリックス反応厚さは非常に類似した。

RERTR-7 は、7A と 7B のプログラムから構成されている。RERTR-7A は、RERTR-6 実験設備の高燃焼度化と高出力化を狙ったものであり、また、6061-Al、4043-Al、Al-0.5Si、Al-2.0Si、Mg を含む改良型母材の影響を調べるためにある。2005 年 11 月 24 日に ATR 原子炉の B-11

に装荷され、2006年1月14日までの51日照射された。一方、RERTR-7Bは三元系からなる燃料合金の性能評価を調べるために、2006年1月20日からATR原子炉のB-12照射孔で照射してきたが、2月13日において、後備ディーゼル発電機の起動失敗によりスクラムをし照射が中断した。再起動は2月19日に行われたが、3月9日に商用電源断により再度スクラムした。このため、51日の照射計画に対して39日の照射であった。スクラムした2006年2月13日に、ATRの排気筒モニタにより燃料破損が発生していることを確認している。原因を調査した結果、RERTR-7AのCキャップセル内の2枚のプレートで割れが発生していることを確認した。これは、計画外の運転停止に伴う急激な熱過渡が高燃焼の燃料板に加わったためである。

RERTR-8は、三元系の燃料合金(U-7Mo-1Ti,U-7Mo-2Zr)の高燃焼による相互作用及びモノリス燃料の照射性能を調べるために計画された。マグネシウム母材のU-7Mo分散型合金燃料の性能評価も実施した。この組成は、RERTR-3の実験設備のナノプレートでも実施されたが、RERTR-8ではミニプレートのスケールになったものである。2006年10月13日に炉心のB孔にDキャップセルとして装荷され、1サイクル照射後移動された。また、同照射設備では、熱間等静水圧圧縮形成(HIP法)によるミニプレートが照射された。照射挙動は概ね良好であり、接合部も強固な状態が維持されていた。

さらに、RERTR-8では、ATRでのフルサイズ燃料(幅75mm×高さ600mm×厚さ1.25mm)の照射性能を評価するため、AFIP(ATR Full-size plate In center flux trap Position)設備で照射試験を実施した。この設備には、分散型合金燃料2枚及びモノリス燃料2枚の合計4枚の燃料を収納し、2サイクル照射した。照射条件は、分散型~310W/cm<sup>2</sup>、モノリス燃料~260W/cm<sup>2</sup>で、最高燃焼度70%付近まで実施した。熱流束の違いは、分散型のウラン濃縮度が25%に対しモノリスが20%であるためである。

ATR原子炉で照射するRERTR-9A/B照射設備では、高密度8.5g/cm<sup>3</sup>にSiを0~4.8%添加、Al-2%Si、AlとSiの混合をしたミニプレート(25mm×100mm×1.4mm)を製作した。BWXT社では幾つかのフルプレートとしてAl-4043やAl-2Si合金混合の8.0g/cm<sup>3</sup>以上の密度の燃料を製作した。

AFIP-2,AFIP-3設備は、フルサイズ燃料板を用いて、照射条件での寸法安定性の評価を実施するものである。AFIP-2実験設備用は、ウラン密度8g/cm<sup>3</sup>分散型とモノリス燃料で構成された。2枚のモノリス燃料の形状は、600mm×50mm×1.27mmであり、摩擦かくはん溶接(FSW)と熱間等方圧(HIP)の高出力組み合わせで製作された。1枚はSiを混ぜたもの、もう1枚は燃料板と被覆材の間にZrを敷いたものである。HIPはY-12で製作され、一方、FSW型はアイダホ国立研究所で製作された。これらのモノリス燃料は、2007年にATRで照射された。

2008年度時点における米国では、燃料として、U-Mo分散型燃料とU-Moモノリス燃料の開発が進められている。U-Mo分散型燃料での割れが発生するようなスウェーリングの防止対策として、主に燃料芯材にSiを添加したものが開発されているが、決定的な対策が見いだされていない。

Table3-1 RERTR プログラムの小型燃料板照射

| 実験  | RERTR-1            | RERTR-2            | RERTR-3            | RERTR-4            | RERTR-5            | RERTR-6            | RERTR-7             | RERTR-8          | RERTR-9           |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| 原子炉   | ATR                 | ATR              | ATR               |
| 燃料形状  | ミニプレート              | ミニ&フルスケール        | ミニ&フルスケール         |
| プレート数   | 20                 | 22                 | 43                 | 25                 | 27                 | 32                 | 29                  | 14*2             | 30                |
| U-Mo 燃料粒子<br>製造方法                                     | 機械的粉碎法又は<br>アトマイズ法  | アトマイズ<br>ド法      | アトマイズ<br>ド法       |
| 濃縮度 (% $^{235}\text{U}$ )                             | 19.5               | 19.5               | 19.5               | 19.5               | 19.5               | 19.7               | 58                  | 20,25,58         | 58                |
| ウラン密度 (g/cm <sup>3</sup> )                            | 4.0                | 4.0                | 8.5                | 6.0, 8.0           | 6.0, 8.0           | 6.0                | N/A                 | N/A              | ~8.4              |
| Mo 含有率 (wt%)  | 4 to 10            | 4 to 10            | 6 to 10            | 6 to 10            | 6 to 10            | 7 or 10            | 7 to 10             | 7                | 7                 |
| 最大表面熱流束<br>at BOC* <sup>4</sup> (W/cm <sup>2</sup> )  | 55                 | 55                 | 390                | 210                | 320                | 140                | ~324                | ~307             | ~400              |
| 最大被覆温度 (°C)   | 65                 | 65                 | 150                | 130                | 175                | <200               | ~123                | ~115             | N/A               |
| 冷却水流速 (m/s)   | 7.6                | 7.6                | 6.0                | 4.0                | 4.0                | N/A                | N/A                 | N/A              | N/A               |
| 試験の状況*1   | 完了                  | 完了               | 完了                |
| 照射サイクル数   | 2                  | 8                  | 2                  | 7                  | 3                  | 3                  | 1                   | 2                | 2,3               |
| 照射時間 (日)  | 94                 | 232                | 48                 | 230                | 116                | 135                | 51~90               | 105              | 115               |
| 平均燃焼度<br>(at EOC* <sup>4</sup> , % $^{235}\text{U}$ ) | 40                 | 70                 | 40                 | ~80                | 50                 | 35~49              | 50~90* <sub>3</sub> | 90* <sub>3</sub> | ~98* <sub>3</sub> |

\*1 : PIE、照射後試験

\*2 : 14枚中7枚はモノリス燃料

\*3 : LEU換算

\*4 : BOC = 運転サイクル初期、EOC = 運転サイクル末期

N/A : 該当無し

### 3.2 仏国 U-Mo グループによる開発の状況

仏国 U-Mo グループは、ウラン密度 $\sim 8\text{g/cm}^3$ 、U-7%Mo 仕様の U-Mo 分散型燃料の実用化を目指して、Table3-2 に示すフルプレート試験を行ってきた。このうち、UMUS、FUTURE 試験が照射燃料の異常により中断に至っている。各試験の概況を以下に示す。

#### (1) IRIS1

IRIS1 試験は、ウラン密度  $8\text{g/cm}^3$  の燃料板を用いて、仏国 OSIRIS で行われ、良好な照射挙動が示された。燃料粒子は、機械的粉碎法による 7~9wt%Mo 含有の U-Mo 合金粒子が用いられた。照射条件は、熱流束 $\sim 136\text{W/cm}^2$ 、被覆材温度 $\sim 72^\circ\text{C}$ であった。局所最大燃焼度は 67.5%に達していたが、その場所の最大スウェーリングは 6%以下にとどまった。また、照射後試験の結果、燃料心材とマトリックスの反応生成物は従来想定されていた $(\text{U},\text{Mo})\text{Al}_3$  及び $(\text{U},\text{Mo})\text{Al}_4$ ではなく $(\text{U},\text{Mo})\text{Al}_7$ であること、UMo 粒子内にアルミニウムの拡散が無いことが示された。この結果は米国の RERTR-4 の評価結果と一致している。

#### (2) UMUS

UMUS 試験は、オランダ HFR で、機械的粉碎法で燃料粒子を製造したウラン密度  $8\text{g/cm}^3$  でウラン濃縮度が異なる燃料板を用いて行われた。ウラン濃縮度約 20%の 2 枚の燃料板は表面熱流束  $140\sim 170\text{W/cm}^2$  で、ウラン濃縮度約 35%の 2 枚の燃料板は表面熱流束  $240\sim 250\text{W/cm}^2$  で照射が行われた。このうち、ウラン濃縮度約 35%の燃料の一枚において、第 2 サイクル（平均燃焼度約 15%）で燃料被覆に約 17mm の長さの亀裂が生じた。燃料板破損の原因是、燃料材表面に熱伝導率の低いベーマイト層が形成されたことにより、被覆材表面温度が  $230\sim 250^\circ\text{C}$  以上の高温となったためと推定された。

#### (3) FUTURE

FUTURE 試験では、ベルギー BR2 を用いて、アトマイズ法で燃料粒子を製造したウラン密度  $8\text{g/cm}^3$  の 2 枚の U-Mo プレートの照射が行なわれていた。最大被覆温度は $\sim 130^\circ\text{C}$ 、最大表面熱流束は $\sim 340 \text{ W/cm}^2$  であった。燃焼度約 28%の時点で 1 枚の燃料板に局所スウェーリングが生じたため、本プログラムは中断された。この燃料版の破壊試験が、2003 年度末までの予定で SCK/CEN で行われていることが 2003 年 RERTR 会議にて報告された。

#### (4) IRIS2

IRIS2 試験では、仏国 OSIRIS を用いてアトマイズ法で製造された燃料板の照射が進められている。2003 年 10 月の RERTR 開催時点では、最大燃焼度は 28%で測定された厚さの増加は  $25\mu\text{m}$  (2%に相当) であり、良好な照射挙動が報告されている。

#### (5) IRIS-3

IRIS-3 試験では、アトマイズ法で燃料粒子を製造したものに 0.3%若しくは 2.1%の Si を添加したウラン密度  $7.8\sim 8.0\text{g/cm}^3$  の 4 枚の燃料板を OSIRIS 原子炉で 2005 年から 2006 年に 7 サイクル照射した。燃料板平均燃焼度は 48.8%で、アルミニウム合金の燃料板表面最高温度は  $83^\circ\text{C}$  であった。ベルギーのホットラボで照射後測定をした結果、最大のスウェーリングは  $90\mu\text{m}$  であった。

#### (6) IRIS-TUM

IRIS-TUM 試験では、機械的粉碎法で燃料粒子を製造したものに未添加若しくは 2.1%の

Si を添加したウラン密度  $7.3\sim8.4\text{g/cm}^3$  の 4 枚の燃料板を OSIRIS 原子炉で 2005 年から 2007 年に 8 サイクル照射した。因みにウラン濃縮度は 49.5%であることから、Jules Horowitz Reactor (以下、「JHR」という。) 原子炉用燃料として照射したものと思われる。燃料板平均燃焼度は 35.3~59.3%で Al-Fe-Ni 合金 (JHR 用燃料被覆材と思われる。) の燃料板表面最高温度は 97°C であった。ベルギーのホットラボで照射後測定をした結果、最大のスウェーリングは 93~104 $\mu\text{m}$  であった。

#### (7) IRIS-4

IRIS-4 試験では、アトマイズ法で燃料粒子を製造したものに未添加若しくは 2.1%の Si を添加したウラン密度  $7.9\text{g/cm}^3$  の 4 枚の燃料板を OSIRIS 原子炉で 2008 年から 2009 年にかけて 5~6 サイクル照射する計画である。燃料板平均燃焼度は 50%以上で、Al-Fe-Ni 合金の燃料板表面最高温度は 100°C を予定している。

2008 年度時点における仏国では、燃料として、U-Mo 分散型燃料の開発が進められている。U-Mo 分散型燃料での割れが発生するようなスウェーリングの防止対策として、主に燃料芯材に Si を添加したものが開発されているが、決定的な対策が見いだされていない。

Table3-2 フルサイズプレートの試験

| 試験名  | IRIS 1<br>OSIRIS(Fr) | UMUS<br>HFR(Holl) | IRIS 2<br>OSIRIS(Fr)                   | FUTURE<br>BR2(B)  | IRIS-3<br>OSIRIS(Fr) | IRIS-TUM<br>OSIRIS(Fr) | IRIS-4<br>OSIRIS(Fr) |
|--|----------------------|-------------------|--|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 燃料形状   | フルサイズ<br>プレート        | フルサイズ<br>プレート     | フルサイズ<br>プレート                          | フルサイズ<br>プレート     | フルサイズ<br>プレート        | フルサイズ<br>プレート          | フルサイズ<br>プレート        |
| 照射プレート数  | 3                    | 4                 | 4                                      | 2                 | 4                    | 4                      | 4                    |
| U-Mo燃料粒子製造方法   | 機械的<br>粉碎法           | 機械的<br>粉碎法        | アトマイズ法                                 | アトマイズ法            | アトマイズ法               | 機械的<br>粉碎法             | アトマイズ法               |
| ウラン濃縮度 (% 235U)  | 19.75                | 19.75 / 35        | 19.75                                  | 19.75             | 19.75                | 49.5                   | 19.75                |
| ウラン密度 (g/cm <sup>3</sup> )                             | 8.0                  | 8.0               | 8.0                                    | 8.0               | 7.8~8.0              | 8.0~9.0                | 7.9                  |
| Mo含有率 (wt%)  | 7, 9                 | 7, 9              | 7                                      | 7                 | 7.2                  | 8.1                    | 7                    |
| 最大表面熱流束 at BOC <sup>*2</sup><br>(W/cm <sup>2</sup> )   | 120                  | 170               | 230                                    | 340               | 201                  | 250~258                | 290                  |
| 最大被覆温度 (°C)  | 75                   | 90 / 110          | 110                                    | 130               | 83                   | 97                     | 100                  |
| 冷却水流速 (m/s)  | 8                    | 8                 | 8                                      | 12                | N/A                  | N/A                    | N/A                  |
| 試験の状況 <sup>*1</sup>                                    | 完了                   | 中止                | 完了                                     | 中止                | 中止/完了 <sup>*1</sup>  | 完了                     | 計画中                  |
| 照射サイクル数  | 10                   | 2                 | 2 <sup>(1)</sup> /4 <sup>(2)</sup>     | 2 <sup>(1)</sup>  | 7                    | 8                      | 5~6                  |
| 平均燃焼度<br>(at EOC <sup>*2</sup> , % <sub>235U</sub> )   | 50                   | 15                | 28 <sup>(1)</sup> / >50 <sup>(2)</sup> | 28 <sup>(1)</sup> | 48.8                 | 35.3~59.3              | 50<                  |
| 局所最大燃焼度<br>(at EOC <sup>*2</sup> , % <sub>235U</sub> ) | 67                   | 20                | 32.5                                   | 32.8              | 59.3                 | 56.3~88.3              | N/A                  |

(1) 到達点、(2)目標値

\*1 : 燃料芯材に 0.3%Si 添加は中止になり、2.1%Si 添加は完了している。

\*2 : BOC = 運転サイクル初期、EOC = 運転サイクル末期  
N/A : 該当無し

### 3.3 その他の国の動向

#### (1) ロシア

ロシアの RERTR 計画は、従来の管状燃料要素に加えて、ユニバーサル棒状燃料要素の開発を進めており、近い将来に、多くのロシアの研究炉及び試験炉の燃料の変更が可能となる見通しとされている。

#### (2) 韓国

KAERI が開発を進めている U-Mo 分散型ロッドタイプ燃料は、ウラン密度  $6\text{g}/\text{cm}^3$  にて燃料破損を生じたため、ウラン密度  $4.0\sim4.5\text{g}/\text{cm}^3$  の燃料の照射試験を HANARO で実施した。KOMO-3 計画で照射したウラン密度  $4.5\text{g}/\text{cm}^3$  には、燃料芯材に Zr 又は Si を添加したものを使用した。これらの照射後試験の実施計画を進めている。最新の照射計画は、KOMO-4 計画であり、燃料芯材に Zr や Ti を混ぜたものを照射する予定でいる。また、韓国から、アトマイズド燃料の粒径が大きい方が照射結果として良好を示す報告がある。

#### (3) スウェーデン

スタズビック社の R2 は、2004 年に期限が切れる現行のライセンスを更新するにあたり、燃料を  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料（ウラン密度  $4.8\text{g}/\text{cm}^3$ ）から U-Mo 燃料（ウラン密度  $7.0\text{g}/\text{cm}^3$ ）に変更することを選択肢の一つとして検討した。このため、2005 年中の R2 炉用の U-Mo 燃料設計に対する認可を得ることを目標として、U-Mo 燃料集合体の照射試験を計画した。同集合体用の燃料板は、既に CERCA 社により製造され、2002 年 12 月上旬に組立前の検査を終えた。しかしながら、何らかの理由により、2005 年 6 月、R2 原子炉施設は廃止となった。

#### (4) カナダ

カナダ原子力公社は研究炉のために高密度の U-Mo 燃料を国際協力の下で開発していた。NRU (135MW 重水炉、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  棒状燃料) 及び MAPLE 原子炉施設のため、チョークリバー核研究所でウラン密度  $4.5\text{g}/\text{cm}^3$  の U-7%Mo 及び U-10%Mo のミニエレメントを製作し、2003 年 5 月～2004 年 12 月まで NRU で 8 本照射した。この密度を使用することにより従来に比し約 43%多く炉心にウランを装荷することになる。これは、燃料交換までの運転期間の延長若しくは運転サイクル期間を決定するための燃料交換条件の緩和であり、従って燃料サイクルのコスト低下を意味する。その照射した結果、燃焼度 80%まで燃焼した U-7%Mo 燃料はフィン間に軸方向で 2cm の割れが発生した。一方、U-10%Mo には問題は発生していない。

#### (5) アルゼンチン

2005 年にウラン濃縮度 20%の UMo-Zry モノリス燃料のミニプレートを照射し、照射中においては、良好な結果であった。新しいデータ取得のため、Zr を被覆したウラン濃縮度 58%の U-8%Mo と U-10%Mo のモノリス燃料のミニプレートを熱間圧延方法 (HIP 法) により製作した。また、ウラン密度  $8\text{g}/\text{cm}^3$  の MTR 用の Si を添加した U-7%Mo 板状燃料も製作した。

RA3 原子炉で照射するため①アトマイズ法で製作した U-7%Mo ウラン密度  $7\text{g}/\text{cm}^3$  と  $8\text{g}/\text{cm}^3$  のミニプレート、②標準より大粒径のアトマイズ法で製作した U-7%Mo ウラン密度  $7\text{g}/\text{cm}^3$  と  $8\text{g}/\text{cm}^3$  に Si 添加したミニプレートを製作し、ブリストラ検査、超音波試験、外観検

査等を実施した。

#### (6) チリ共和国

チリ共和国には、5MW のオープンプールタイプの RECH-1 原子炉があり、1974 年から 80%高ウラン濃縮度燃料により運転を開始していた。2002 年に LEU 燃料 ( $U_3Si_2$  燃料) で炉心が構成された。燃料製造工場で製造された燃料はオランダのペテンの HRF に持ち込まれ、2003 年 3 月から 2004 年 8 月まで約 55%まで燃焼された。U-Mo 燃料の研究開発を始めた他に、ISO9001 認証を受けた。U-Mo 燃料の開発として、Mo 含有率を 7~10wt%、密度を 3、5、6、7g/cm<sup>3</sup>とした。U-Mo 燃料はアルゴン雰囲気で誘導溶解し、980°C、72 時間で均一化を図り製作した。最近の研究として、三元系の合金 (Si,Ti,Zr) を各 1wt%混入した燃料芯材と母材との相互作用を調べている。

### 3.4 燃料製作メーカー (CERCA 社) からの技術情報

2008 年 9 月に JRR-3 燃料体製作に係る工場立会検査を仏国 CERCA 社において実施した際に、U-Mo 燃料開発に関して入手した情報は以下のとおりである。

- (1) U-Mo 燃料のスウェーリング対策として、Si を添加する方法があり、Si を 2.1%添加したフルサイズプレートの照射試験を実施した結果、燃料にスウェーリングは発生しなかった。
- (2) U-Mo 燃料のスウェーリング対策として、酸化被膜で燃料粒子を覆う方法があり、スウェーリングの問題は解決できる見込みであり、フルサイズプレートの照射試験を実施する予定である。

### 3.5 U-Mo 分散型燃料におけるスウェーリング対策

2008 年度時点では、U-Mo 分散型燃料での割れが発生するようなスウェーリングの防止対策として、以下に示す多種多様な研究が開始されているが、決定的な対策が見いだされていない。

U-Mo 分散型燃料における異常なスウェーリング防止対策として、燃料芯材に Si を添加したものが開発されている。その他として、韓国ではアトマイズド燃料の粒径を大きくした燃料 (200~300μm) の照射後試験結果が良好であることから、さらに、大きな粒径 (500μm) の燃料が開発されている。また、米国では、Ti や Zr を添加したものも研究されている。燃料被覆材の開発においては、米国や仏国で、燃料板のスウェーリング緩和のため、燃料芯材と被覆管の間に Si 層や Zr 層を設けたもの、また、従来から使用している被覆材の材料である Al 合金に、2%~5%Si 添加した Al 合金若しくは Al-Fe-Ni (Al に Fe を 1%、Ni を 1%、Mg を 1%添加した合金) に変更して、照射する実験が行われている。

### 3.6 海外の U-Mo 燃料の採用状況

海外の試験研究炉の U-Mo 燃料への導入計画について調査を行った。U-Mo 燃料による運転を計画している仏国の JHR 及び低濃縮化を検討しているベルギーの BR2 (Belgian Reactor No.2) の今後の燃料導入計画に関する調査結果を以下に記す。

### (1) JHR の動向

JHR は、2014 年の運転開始を目指して、現在建設中の研究炉である。当初は、ウラン濃縮度 19.75%、ウラン密度  $8\text{g}/\text{cm}^3$  の U-Mo/Al 燃料の導入が計画されていた。しかし、現在は、U-Mo 燃料の開発状況の遅れから、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料（ウラン濃縮度 27%、ウラン密度  $4.8\text{g}/\text{cm}^3$ ）による運転開始に計画を変更している。使用される  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料は、バックアップ燃料と位置づけられており、U-Mo 燃料（ウラン濃縮度 19.75%、ウラン密度  $8\text{g}/\text{cm}^3$  U-Mo）の技術的な安全性が確認されれば、直ちに U-Mo 燃料を導入するとしている。JHR が導入する燃料に関して要求しているのは、次の 3 項目である。

- ①費用対効果に優れた高性能の燃料であること。
- ②高ウラン密度の低濃縮燃料であること。
- ③再処理可能であること。

これらを満足する燃料が、ウラン濃縮度 19.75%、ウラン密度  $8\text{g}/\text{cm}^3$  の U-Mo/Al 燃料であるとしている<sup>1)</sup>。

### (2) BR2 の動向

BR2 では、高濃縮アルミナナイト燃料（ウラン濃縮度 93%、ウラン密度  $1.3\text{g}/\text{cm}^2$ ）を使用しており、低濃縮化への検討が米国との間で進められている<sup>2)</sup>。その対象として U-Mo 及び  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料を挙げている。また、低濃縮化に伴い燃料に添加される可燃性毒物の添加量及び形状の最適化が必要であるとして、B<sub>4</sub>C、Cd 及び Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を添加した U-Mo 燃料（ウラン濃縮度 19.6%、ウラン密度  $8.5\text{ g}/\text{cm}^3$  又は  $7.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）及び  $\text{U}_2\text{Si}_3$  燃料（ウラン濃縮度 19.6%、ウラン密度  $4.8\text{ g}/\text{cm}^3$ ）について核計算（MCNP）を用いた検討が報告されている<sup>3)</sup>。

今後も、U-Mo 燃料の開発状況と合わせて、海外における U-Mo 燃料の採用状況を継続的に調査していく必要がある。また、JHR 及び BR2 の燃料導入計画について注目していく必要がある。

## 4. U-Mo 燃料への移行のスケジュール

海外における U-Mo 燃料の開発終了時点を開始時期として供用運転開始までの U-Mo 燃料移行スケジュールについて検討を行った。Table4-1 に U-Mo 燃料開発終了後の移行スケジュールを示す。スケジュール項目は、(1) 各種試験（①照射試験、②照射試料の輸送、③照射後試験）、(2) 原子炉に係る安全審査、(3) 燃料の製作に係る設工認、(4) U-Mo 燃料の製作、(5) 炉心特性試験とした。以下に各項目の内容について述べる。

### (1) 各種試験

#### ①照射試験

照射試験のスケジュールは、JMTR の  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料移行時における照射試験の実績を基に作成した<sup>4)</sup>。照射試験に係る安全審査期間は、事前説明を考慮して 1.5 年、照射試料の製作に 1 年、照射試験は、準備も含め 1 年として合わせて約 3.5 年とした。

## ②照射試料の輸送

照射試料の輸送は、原子力科学研究所のホット試験施設で照射後試験を行うために、大洗のホットラボから東海のホット試験施設への輸送を想定した。JMTR の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料移行時の実績では、引張試験、破壊試験を行うために、照射した試料の一部を東海ホットラボに輸送している。輸送期間は、準備を含めて約半年とした。尚、輸送キャスクに仕様変更が必要な場合には、事前に安全審査期間が必要となる。

## ③照射後試験

照射後試験のスケジュールは、JMTR の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料移行時における実績を基に作成した<sup>4)</sup>。照射後試験に係る安全審査の内容としては、照射後試験に係る安全審査の他、照射後試験を行う施設の改造に係る安全審査を含むものとする。安全審査期間は、事前説明に半年、申請から認可までを 1 年として合わせて 1.5 年とした。施設の改造は、その時点における施設の設備能力にもよるが 1 年とした。照射後試験期間は、実績を基に 2.5 年とした。

以上を合わせて、照射後試験期間は、約 5 年とした。

## (2) 原子炉に係る安全審査

原子炉に係る安全審査（原子炉設置変更許可の申請）期間は、JRR-4 の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料への移行実績を基に事前説明に 1 年、申請から許可までを 1 年として、合わせて約 2 年とした。

## (3) 燃料の製作に係る設工認

燃料の製作に係る設工認期間は、JRR-4 の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料への移行実績を基に事前説明に 1 年、申請から認可までを 2 ヶ月として、合わせて約 1.2 年とした。

## (4) U-Mo 燃料の製作

燃料の製作期間は、ウラン入手に 1 年、燃料の製作に 2 年として、合わせて約 3 年とした。本スケジュールでは、事前に燃料製作会社との契約を済ませ、原子炉に係る安全審査及び燃料の設工認の期間の終了後直ちに燃料製作を開始することを想定している。

## (5) 炉心特性試験

炉心特性試験は、JRR-3 の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料移行時の実績によると 15 の試験項目を約 2 ヶ月で実施しており、U-Mo 燃料移行時にも同様の期間が必要と考えた。

以上をまとめると、海外における U-Mo 燃料の開発終了時点から共用運転開始までに（1）各種試験、（2）原子炉に係る安全審査、（3）燃料の製作に係る設工認、（4）燃料の製作、（5）炉心特性試験の 5 項目を合わせて約 11 年となった。スケジュールは、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料移行時の実績を参考に作成しているため、U-Mo 燃料の導入に当たっては、照射後試験の内容、照射後試験施設の設備能力、燃料製作期間等により前後すると考えられる。

Table4-1 U-Mo燃料への移行スケジュール  
(海外のU-Mo燃料開発終了時をスケジュール開始時期とする)

| 項目              | 年        | 1          | 2        | 3          | 4        | 5     | 6        | 7           | 8    | 9  | 10 | 11 |
|-----------------|----------|------------|----------|------------|----------|-------|----------|-------------|------|----|----|----|
| (1) 各種試験        | ①照射試験    | 安全審査<br>申請 | 製作<br>認可 | 照射試験       |          |       |          |             |      |    |    |    |
|                 | ②照射試料の輸送 |            |          |            | 輸送       |       |          |             |      |    |    |    |
|                 | ③照射後試験   |            |          | 安全審査<br>申請 | 改造<br>認可 | 照射後試験 |          |             |      |    |    |    |
| (2) 原子炉に係る安全審査  |          |            |          |            |          |       | 申請<br>許可 |             |      |    |    |    |
| (3) 燃料の製作に係る設工認 |          |            |          |            |          |       |          | 申請<br>認可    |      |    |    |    |
| (4) U-Mo燃料の製作   |          |            |          |            |          |       |          | ウラン入手<br>契約 | 製作開始 | 製作 | 納入 |    |
| (5) 反応特性試験      |          |            |          |            |          |       |          |             |      |    |    | ↔  |

## 5. U-Mo 燃料移行時の安全審査等で必要なデータの検討

### 5.1 方針

本調査では、JMTR 及び JRR-3 が想定するウラン密度 4.8g/cm<sup>3</sup>、ウラン濃縮度 19.75%を中心とし、U-Mo 燃料採用に係る安全審査のために必要なデータを明らかにし、今後取得すべきデータについて以下の方針で検討を行う。

- (1) U-Mo 燃料移行時の安全審査などで必要なデータ項目について、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料への移行時の安全審査、審査過程の質問等で必要となったデータ等を参考に検討する。
- (2) 2003 年度以降に取得されたデータ並びに安全審査に適用可能なデータの整備状況について調査を行う。米国、仏国等において取得されるデータを最大限活用し、重複するデータは取得しない。

### 5.2 U-Mo 燃料移行時の安全審査等で必要なデータの検討

Table5-1 の第 1 列に U-Mo 燃料移行時の安全審査などで必要なデータ項目を示す。データ項目は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料移行時に安全審査で必要とされたデータ、審査過程の質問等で必要となったデータを考慮して定めた。U-Mo 燃料では、燃料とマトリックスの反応層成長が U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料に比べて顕著なため、反応熱測定と反応層生成の評価とを分けた。

第 2~7 列には、RERTR、仏国開発グループが計画している試験条件について、2003 度にまとめられた結果を示す。ここで、網掛け部分は試験条件に関する情報が得られていないため、スウェーリング挙動と同条件と仮定されている。U-Mo 分散型燃料では、燃料芯材とマトリックスの反応層生成がスウェーリング挙動と密接に関係するため、同じ試験結果を用いて両項目を評価することは適当と考えられる。

最近の国際会議 (RERTR 及び Reduced Enrichment for Research Reactor (以下、「RERTR」という。) 等) で報告された情報に基づき、第 8~12 列には KAERI (韓国) グループが、第 13~16 列には AECL (カナダ) グループが実施している照射試験条件及び現在までに得られている試験結果を示す。2003 年度にまとめられた RERTR、仏国開発グループのデータ取得計画を補足する程度であり、安全審査に必要と考えられる熱伝導率、比熱容量といった基礎物性データに加え、燃料の寸法安定性などに係る照射挙動データの取得に関して、ここ数年間で大きな進展は見られていない。

第 17~21 列には JRR-3 で必要とされる試験条件を示す。なお、本節では JMTR についても検討を行ったので、第 22~26 列に JMTR で必要とされる試験条件を示す。

表中の白抜きの丸印 (○) は、各国の開発グループでデータを取得する計画である、もしくは現在取得が進められている項目である。第 17~21 列及び第 22~26 列の二重丸印 (◎) は、各国の開発グループの計画で取得が計画されていない項目及び計画されている試験条件が原子力機構の要求を満足しない項目である。JRR-3 ではブリストラ発生温度、スウェーリング挙動、U-Mo と Al との両立性(反応熱を除く)、FP ガス放出率が該当する。ブリストラ発生温度試験は、RERTR、仏国開発グループの計画では、未照射燃料を用いた試験のみが予定されている。ブリストラは、燃料芯材と被覆管との結合状態が悪い場合に発生し、燃焼が進み燃料芯材と被覆材

との間に FP ガスが蓄積され両者の結合が悪くなつた場合に発生温度が低下する。 $U_3Si_2$  燃料ではブリスタ発生温度の燃焼度依存性が小さかつたため、海外では未照射燃料の試験のみが計画されたと考えられる。我が国の  $U_3Si_2$  燃料導入時の安全審査においては、ブリスタ発生温度が燃焼度にほとんど依存しないことを示した上で評価上の発生温度を定めた。U-Mo 燃料の安全審査においても、ブリスタ発生温度燃焼度依存性データの取得が要求されると考えられる。

表中の白抜きの四角印（□）は、原子力機構の想定するウラン密度（ $4.8 \text{ g/cm}^3$ ）が、現時点で標準的と推定される U-Mo 燃料のウラン密度（ $6\sim8 \text{ g/cm}^3$ ）と異なるために、データ取得による確認が望ましい項目である。U-Mo 燃料で観察されている燃料粒子と Al マトリックスの反応層は密度が低く、その成長はスウェーリングの増加、熱伝導率の低下及び機械強度の変化をもたらすと考えられる（Fig.5-1 参照）。米国 ANL (Argonne National Laboratory) の ATR (Advanced Test Reactor) で行われた照射実験結果によれば、スウェーリングは U-Mo と Al の反応層の成長に支配されることが明らかとされている。Al 量に比例して反応生成物の量が増加するならば、ウラン密度が低く Al 量が多い燃料の照射挙動が穏やかであるとは断定できないので、試験項目は慎重に選定されるべきである。このため、JRR-3 では、熱伝導率、熱容量、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数、スウェーリング挙動、U-Mo と Al との両立性が白抜きの四角印（□）に該当する。なお、JMTR では熱伝導率、熱容量、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数、U-Mo と Al との両立性（反応熱）が白抜きの四角印（□）に該当する。ただし、燃料板の機械的強度の評価は、安全審査対応の観点からは、アルミ被覆材の機械的強度が重要であり、 $U_3Si_2$  燃料移行時のデータが活用できると考えられる。そのため、燃料芯材の引張試験によるヤング率測定は予算及び期間に余裕があれば実施することが望ましいものの、安全審査対応の観点からは他の試験項目に比べ優先順位が低いと考えられる。なお、U-Mo 燃料とアルミ被覆材の反応層形成を抑える目的で Al に Si 等を添加した被覆材の開発が最近進められていることから、上記の試験項目は今後の新被覆材料の開発状況によって変化しうる。

U-Mo 二元系合金状態図は、RERTR、仏国開発グループのデータが活用できると考えられる。反応度投入事象時の燃料破損しきい値の試験は、 $U_3Si_2$  燃料移行時に旧原研にて行われた実験データが活用できると考えられる。 $U_3Si_2$  燃料移行時に、反応度投入事象の燃料破損メカニズム及び破損限界を調べるために、NSRRにおいてパルス照射実験が行われた。その結果、 $U_3Si_2$  燃料の破損は、出力上昇により DNB (核沸騰離脱) が生じ被覆材温度が上昇（約  $400^\circ\text{C}$  以上）した後の被覆材のクエンチ（急冷）により生じることが明らかとなった。この結果から、アルミ被覆の板状燃料の反応度投入事象時の破損は燃料材料に依存しないと考えられる。また、旧原研の研究炉で想定される制御棒の異常な引き抜き等の反応度投入事象においては、DNB による被覆材温度上昇が発生するほどの反応度は投入されないことが明らかとなった。以上の点を踏まえると、U-Mo 燃料の反応度事故に関わる試験及びデータ採取の優先順位は他のデータ項目に比べ低いと考えられる。

### 5.3 まとめ

U-Mo 燃料移行時の安全審査に備えるには、燃料の基礎物性データに加え照射挙動データが不可欠であるが、これらの取得に関してここ数年間で大きな進展は見られていない。また、国

際的に標準と考えられるウラン密度 ( $6\sim8 \text{ g/cm}^3$ ) まで範囲を広げても、安全審査に必要と考えられる全てのデータをカバーするまでには至っていない。

なお、 $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料移行時の安全審査では、米国 NRC がまとめた低濃縮  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料に関する Safety Evaluation Report (NUREG-1313) (1988) から多くのデータが引用された。U-Mo 燃料移行時の安全審査においても NUREG-1313 に相当する報告書から必要なデータの多くを引用することになると考えられるが、国際会議 (RERTR-2008) ではその報告書の発行が 2010 年以降にずれ込む見通しとの説明がなされている。

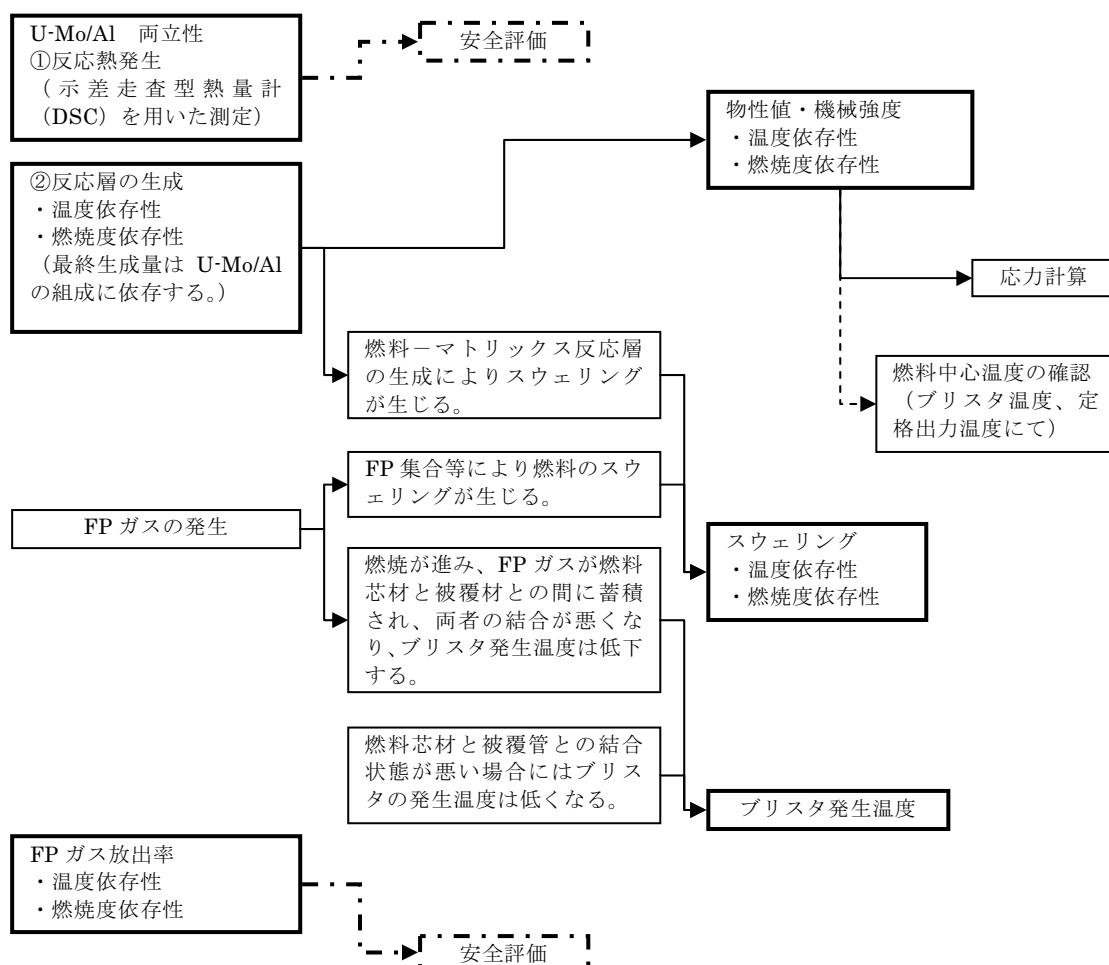


Fig.5-1 取得すべきデータの相互関係

This is a blank page.

Table5-1 U-Mo 燃料移行時の安全審査などで必要なデータと取得計画<sup>注1)</sup>

| 別<br>燃料種<br>別<br>データ取得<br>者<br>データ項目  |                 | U-Mo 燃料             |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          | U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料 |                               |  |  |                     |                               |   |   |   |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------|---------------|------------------------------------|--|--------------------------|----------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|---------------------|-------------------------------|---|---|---|
|                                       |                 | RERTR、仏国開発グループ      |               |               |                                    |  |                          | KAERI    |                                 |                           |                                    | AECL        |          |               | JRR-3 <sup>注2)</sup>         |                          |                    |                                | JMTR          |                                    |                          |                                   | 備考                            | NUREG<br>1313  | 原研   | 備考                  |                               |   |   |   |
|                                       |                 | 取得<br>計画            | 芯材<br>温度<br>℃ | 表面<br>温度<br>℃ | 平均<br>燃焼度<br>%(f/cm <sup>3</sup> ) | 局所<br>燃焼度<br>%(f/cm <sup>3</sup> )                               | 熱流束<br>W/cm <sup>2</sup> | 取得<br>計画 | 芯材<br>温度<br>℃                   | 表面<br>温度<br>℃             | 局所<br>燃焼度<br>%(f/cm <sup>3</sup> ) | 線出力<br>W/cm | 取得<br>計画 | 表面<br>温度<br>℃ | 燃焼度<br>%(f/cm <sup>3</sup> ) | 熱流束<br>W/cm <sup>2</sup> | 取得<br>計画           | 芯材<br>温度<br>℃                  | 表面<br>温度<br>℃ | 局所<br>燃焼度<br>%(f/cm <sup>3</sup> ) | 熱流束<br>W/cm <sup>2</sup> | 取得<br>計画                          |                               |  |  |                     |                               |   |   |   |
| 燃料設計                                  |                 |                     |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          |                                   |                               |  |  |                     |                               |   |   |   |
| 熱伝導率<br>熱容量<br>ヤング率<br>ボアソン比<br>線膨張係数 | 温度依存性           | ○                   | 約<br>400      | 80            | 80                                 |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          | ○                                 | ○                             | NUREG:60°C<br>日本:室温~400°C  |  |                     |                               |   |   |   |
|                                       | 燃焼度依存性          | ○                   |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          | △                                 | ×                             | 一部のデータは理論的に推定される。詳細は計画中。   |  |                     |                               |   |   |   |
| プリスタ<br>発生温度                          | 燃焼度依存性          | ×                   | -             | -             | 0<br>(未照射<br>試料)                   | 0<br>(未照射<br>試料)   | -                        |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ◎                            | -                        | -                  | 90<br>(2.16x10 <sup>21</sup> ) | -             | ◎                                  | -                        | 92<br>(1.9x10 <sup>21</sup> )     | -                             | RERTR、仏国開発グループは未照射試料によるプリスタ発生温度試験のみを計画。  | ○  | ○                   | 日本:JMTR 照射条件下でのデータ            |   |   |   |
| スウェーリング<br>挙動                         | 温度依存性           | ○                   | 200           | 175           | 80                                 | 90   | 390                      | ○        | 照射開始時<br>のピーク温<br>度で<br>170~181 |                           | 63~65                              | 90~99       |          |               | □                            | 定格運転<br>温度<br>(107)      | 定格運転<br>温度<br>(99) | 90<br>(2.16x10 <sup>21</sup> ) | -             | ◎                                  | 定格運転<br>温度<br>(212)      | 定格運転<br>温度<br>(188)               | 92<br>(1.9x10 <sup>21</sup> ) | -  | △  | △                   |                               |   |   |   |
|                                       | 燃焼度依存性          | ○                   |               |               |                                    |  |                          | ○        |                                 |                           |                                    |             |          | ○             | 冷却<br>水温<br>: ~35            | 20、60、80                 | 404<br>以下          | □                              | ○             | 定格運転<br>温度<br>(107)                | 定格運転<br>温度<br>(99)       | 90<br>(2.16x10 <sup>21</sup> )    | 110                           | ◎  | 定格運転<br>温度<br>(212)  | 定格運転<br>温度<br>(188) | 92<br>(1.9x10 <sup>21</sup> ) | 380   | ○ | ○ |
| U-Mo 二元系合金状態図                         |                 | ○                   | -             | -             | -                                  | -  | -                        |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ×                            | -                        | -                  | -                              | -             | ×                                  | -                        | -                                 | -                             | -  | ○  | ×                   |                               |   |   |   |
| U-Mo と Al<br>との両立性                    | 反応熱<br>(DSC 測定) | ○                   | -             | -             | -                                  | -  | -                        |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | □                            | -                        | -                  | -                              | -             | □                                  | -                        | -                                 | -                             | -  | ○  | ○                   | 日本:JMTR 照射条件下でのデータ            |   |   |   |
|                                       | 反応層生成<br>温度依存性  | ○                   | (200)         | (175)         | (80)                               | (90)   | -                        | ○        | 照射開始時<br>のピーク温<br>度で<br>170~181 |                           | 63~65                              | 90~99       |          |               | □                            | 定格運転<br>温度<br>(107)      | 定格運転<br>温度<br>(99) | 90<br>(2.16x10 <sup>21</sup> ) | 110           | ◎                                  | 定格運転<br>温度<br>(212)      | 定格運転<br>温度<br>(188)               | 92<br>(1.9x10 <sup>21</sup> ) | 380  | 反応熱測定対象よりも低温域<br>での温度依存性について評価<br>する。                      | -                   | -                             |   |   |   |
|                                       | 反応層生成<br>燃焼度依存性 | ○                   |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          | ○             | 冷却<br>水温<br>: ~35            | 20、60、80                 | 404<br>以下          | □                              | ○             | 定格運転<br>温度<br>(107)                | 定格運転<br>温度<br>(99)       | 90<br>(2.16x10 <sup>21</sup> )    | 110                           | ◎  | 定格運転<br>温度<br>(212)  | 定格運転<br>温度<br>(188) | 92<br>(1.9x10 <sup>21</sup> ) | 380   | ○ | × |
| 燃料板製作仕様の決定                            |                 | -                   | -             | -             | -                                  | -  | -                        |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | 要                            | -                        | -                  | -                              | -             | 要                                  | -                        | -                                 | -                             | -  | -  | ○                   | ○                             |   |   |   |
| 安全評価                                  |                 |                     |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          |                                   |                               |  |  |                     |                               |   |   |   |
| FP ガス<br>放出率                          | 温度依存性           | ×                   | -             |               |                                    |  | -                        |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ◎                            | 1000                     | -                  | 70                             | -             | ◎                                  | 1000                     | -                                 | 70                            | -  | 本データ項目は EPZ の設定に<br>も影響を与える。測定を行い、<br>現実的な値を得ることが好ま<br>しい。 | ○                   | ○                             | NUREG:~650°C、定量的な評<br>価は行っていない。<br>日本:600~1000°C(BU:20、<br>70%) |   |   |
|                                       | 燃焼度依存性          | ×                   |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ◎                            |                          |                    |                                | ◎             | 1000                               | -                        | 70                                | -                             | RIA 時の燃料挙動は U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料<br>と基本的に同じであり、新規に<br>試験を行う必要はないと考え<br>られる。しかし、状況によつて<br>は規制当局から要求される場<br>合もあるので、測定実施の決定<br>は状況による。 | ×  | ○                   |                               |   |   |   |
| 反応度投入<br>事象時の<br>燃料破損<br>しきい値         | 温度依存性           | ×                   |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ×                            |                          |                    |                                | ×             |                                    |                          |                                   |                               | ×  | ○  |                     |                               |   |   |   |
|                                       | 燃焼度依存性          | ×                   |               |               |                                    |  |                          |          |                                 |                           |                                    |             |          |               | ×                            |                          |                    |                                | ×             |                                    |                          |                                   |                               | ×  | ×  |                     |                               |   |   |   |
| ウラン密度                                 |                 | ~8g/cm <sup>3</sup> |               |               |                                    | 分散型: 4.5g/cm <sup>3</sup><br>multi core fuel: 6g/cm <sup>3</sup> |                          |          |                                 | 分散型: 4.5g/cm <sup>3</sup> |                                    |             |          |               |                              |                          |                    |                                |               |                                    |                          |                                   |                               |  |  |                     |                               |   |   |   |

(f/cm<sup>3</sup>: fission/cm<sup>3</sup>: 1cm<sup>3</sup>当たりの核分裂数)○: データ取得(測定) 計画あり又は取得(測定)済み、◎: 原子力機構としてデータ取得が必須の項目、□: 原子力機構の想定するウラン密度仕様値(4.8g/cm<sup>3</sup>)が標準的なウラン密度(6~8 g/cm<sup>3</sup>)と異なるために、データ取得が望ましいと考えられる項目、△: 一部データ取得済み、×: データ取得計画なし又は取得データなし注1) 燃料板や燃料要素の形状、被覆材の材質は U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料と同様であるとした。 注2) 芯材温度などは U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>炉心における上限値を示す。 注3) 網掛け部は現時点での試験条件が不明であり、スウェーリング挙動と同条件とした。

## 6. 照射計画の検討

### 6.1 照射キャップセルの設計

照射キャップセルは、JMTRにおけるU<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料ミニプレート照射時のキャップセルを参考にして、Fig.6-1に示すような形状とする。1本の照射キャップセルに4枚のミニプレート（寸法：50W×150L×1.27t（mm））を装荷し、炉心に2本～3本の照射キャップセルを装荷し、照射位置は燃料領域とする。また、ミニプレートの軸方向位置は、熱中性子束が最大となる炉心中心高さ付近とする。

U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料ミニプレート照射時のデータによれば、燃料芯材最高温度及び燃料板表面最高温度は、それぞれ約154°C及び約121°Cとなっており、2011年度以降のJMTR炉心で照射する場合も同程度の温度になると思われ、ブリスタ発生温度450°C以下、一次冷却水沸点201°C以下なので熱的問題はなく、U-Mo燃料の被覆材は今まで使用実績のあるアルミニウム合金であることから燃料板に発生する熱応力は小さく、照射中のミニプレートの健全性は確保できると考えられる。なお、キャップセルの詳細設計はガンマ加熱率、冷却水温及び燃料板両側を流れる冷却水流速の評価などを行なながら決定することとする。

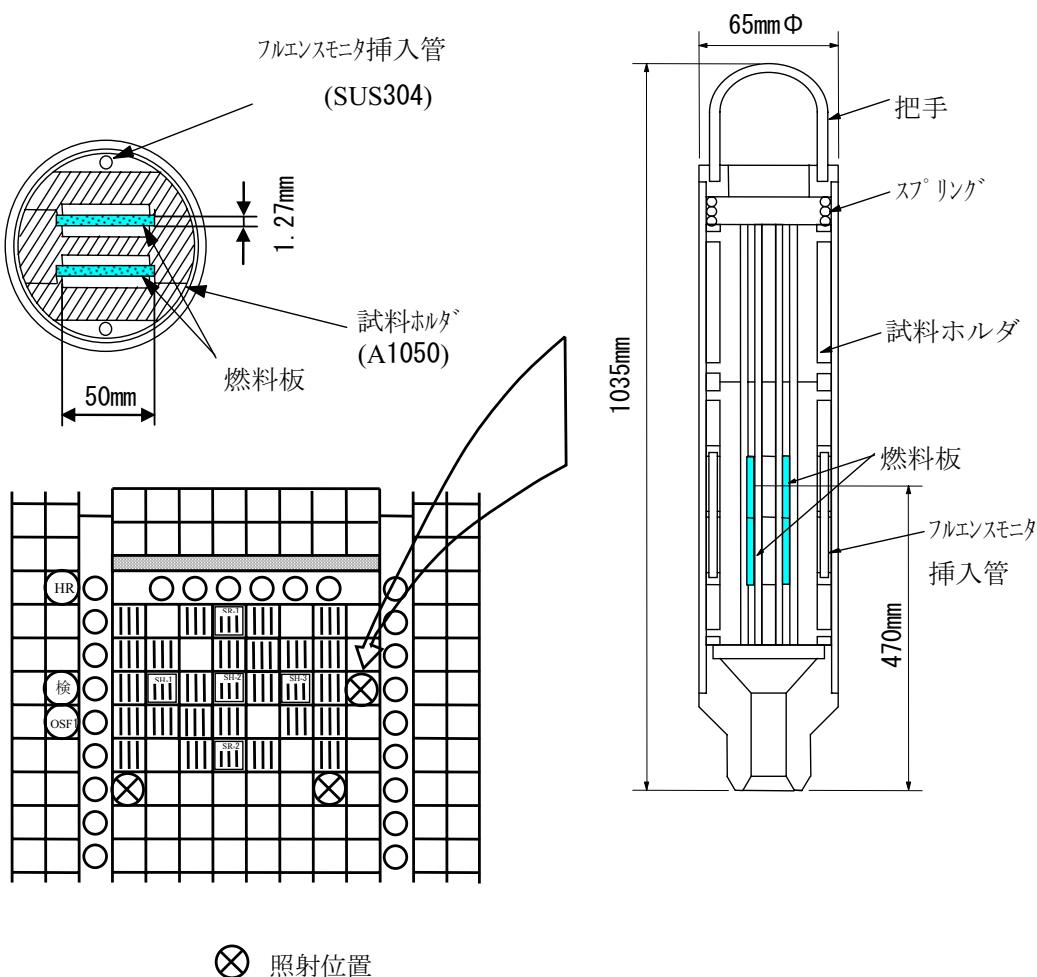


Fig.6-1 U-Mo燃料用照射キャップセル

## 6.2 照射期間の検討

ミニプレートの最高燃焼度は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料の最高燃焼度 60%を包絡する値として、約 70%とする。また、中間段階で取り出す試料の燃焼度は約 35%～45%とする。運転サイクル(50MW、30 日間連続運転) 每のミニプレートの燃焼度は ORIGEN-JR コード用いて評価した。ここで熱中性子束は  $1.70 \times 10^{14} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ とした。Table6-1 に示すように、燃焼度が 70%に達するのは 6 サイクル照射後である。また、中間段階(燃焼度 35%～45%) の試料は 2 又は 3 サイクル終了後に取り出すこととする。

Table6-1 U-Mo ミニプレートの燃焼計算

| 照射サイクル | 燃焼度 (%) | 備 考      |
|--------|---------|----------|
| 1      | 18.4    |          |
| 2      | 33.5    | 中間段階取り出し |
| 3      | 45.7    | 中間段階取り出し |
| 4      | 55.8    |          |
| 5      | 63.9    |          |
| 6      | 70.6    | 最終取り出し   |

## 7. 照射後試験の検討

### 7.1 照射後試験項目

U-Mo 燃料移行時の安全審査などで必要なデータ項目を取得するために必要な照射後試験項目と照射後試験の流れを Fig.7-1 に示す。各試験の概要を以下に示す。

#### (1) 燃料板外観検査

燃料板の有害な孔食、ふくれ、クラック、変形、肌荒れ、斑点等を双眼鏡、ペリスコープ等を用いて観察する。

#### (2) 燃料板 X 線検査

燃料芯材部等の変形、異常の有無及び寸法変化等を X 線を用いて調べる。

#### (3) 燃料板寸法検査

照射によるスウェーリング等の影響を調べるために、ノギス等を用いて燃料板の寸法を測定する。また、照射前後の X 線写真から燃料芯材部の寸法を比較する。

#### (4) 重量・体積検査

照射によるスウェーリング等の影響を調べるために、燃料板の重量、体積を測定する。

#### (5) ガンマスキャニング

ガンマスキャニング及び  $\gamma$  線スペクトル測定により燃焼度を評価する。

#### (6) ブリスタ試験

燃料板の燃料芯材と被覆材との結合性を調べるため、燃料板の加熱試験を行い加熱後の燃

料板の外観検査、板厚測定及びFPガス捕集・分析を行う。

#### (7) FPガス放出率試験

安全評価に資するため、高温時における核分裂生成物（FP）の放出率を測定する。

#### (8) 燃焼度分析

ガンマスキャニングで得たガンマ線強度と絶対燃焼度との関係（校正曲線）を求めるために、抜打ち試料の絶対燃焼度を測定する。

#### (9) 金相試験

照射による燃料の組織変化を調べるために、金相写真による組織観察、燃料板厚さ、燃料芯材厚さ、燃料表面の酸化膜厚さ、U-Mo/Al反応層生成量、燃料芯材部のボイド率等を測定するとともに、X線回析装置による燃料粒子のXRD（X線回折）データを取得する。必要に応じて、SEM（走査型電子顕微鏡）による観察、EPMA（電子線マイクロアナライザ）による試料表面の元素分析等を行う。

#### (10) 物性値検査

照射による物性値への影響を調べるため、熱伝導率、熱容量、熱拡散率、熱膨張率、ウラン密度等の測定を行う。物性値については、燃料芯材温度の評価、燃料被覆の熱応力評価等に使用されるが、ANLにおいて熱伝導率、ウラン密度等を解析により推定する方法が検討されており、この方法を導入することで試験項目を低減できる可能性がある。

#### (11) 機械的強度試験

照射による機械的性質への影響を調べるため、硬度測定を行う。

#### (12) 反応熱測定

安全評価においてU-MoとAlの反応熱が燃料要素の健全性に与える影響を評価するため、DSC（示差走査熱量計）を用いて反応熱を測定する。

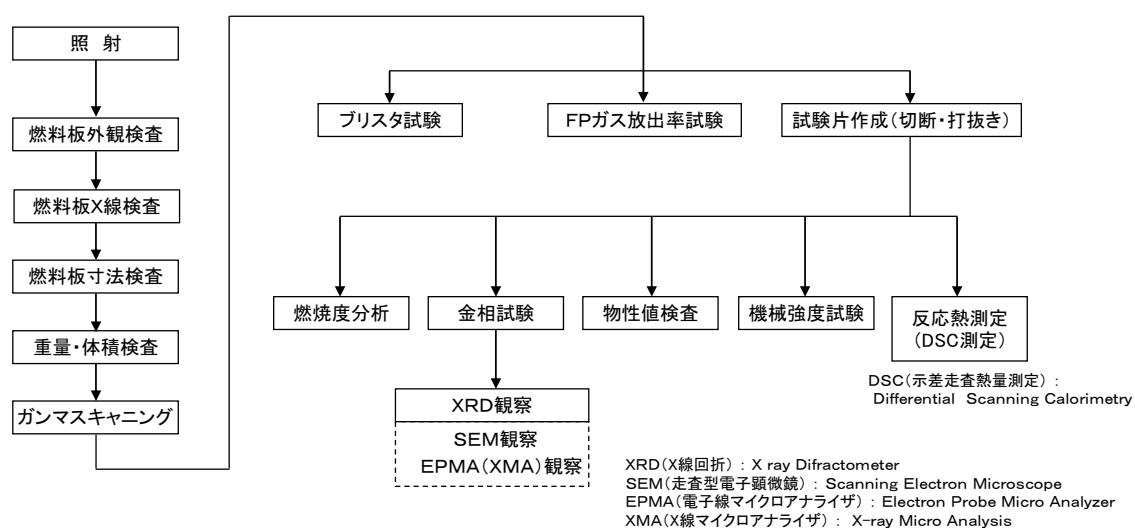


Fig.7-1 照射後試験の流れ

## 7.2 照射試料の寸法と数

照射試料の寸法及び数については、安全審査等で必要な照射データの取得のために検討された照射後試験項目及び照射条件を基に検討を行った。照射後試験項目については、前段において検討した非破壊試験及び破壊試験について各照射後試験項目における必要試料サイズの検討を行い、照射条件については、2種類の燃焼度（40%及び70%）をパラメータとして未照射試料を含めた3種類の試料とした。

照射後試験のうち、非破壊試験は、繰り返し測定が可能でありデータ取得後に破壊試験に転用するため破壊試験について検討を行った。破壊試験は、①ブリスタ試験、②金相試験、SEM観察、熱物性試験、燃焼度分析、硬度測定等、③FPガス放出率測定に区別し検討した。

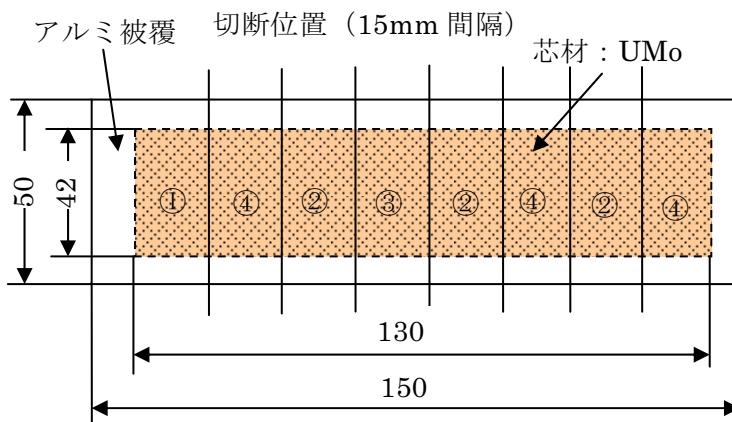
ブリスタ試験及びFPガス放出率測定については、各1試料必要である。その他の破壊試験としては、1試料を切断し、各試験用サンプルを作製することで対応可能であると考えられる。

Fig.7-2に試料切断位置（案）を示す。

その他、照射済試料を実施する前に未照射試料を用いたレファレンス及びモックアップ試験が必要となるため、未照射試料2試料程度の準備が必要である。

以上の結果から、照射試料の数をTable7-1に示す。ブリスタ試験、金相試験、SEM/EPMA、熱物性、硬度等、FPガス放出率測定とし、必要な試料数は、予備2枚を加えて、8枚とする。

試験試料の寸法については、JMTRで行われたU<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>ミニプレート照射実験時の寸法等を参考にしてU-Mo燃料芯材を42W×130L×0.51t、ミニプレート（被覆材含む）寸法を50W×150L×1.27tとした。



### 試験項目

- ①金相試験（縦断面） ②金相試験（横断面）、SEM/EPMA、硬度試験
  - ③燃焼度分析 ④熱物性試験（熱拡散率、比熱、熱膨張率）
- \* 詳細な測定位置は、非破壊試験データを基に決定

Fig.7-2 照射試料切断位置（案）

Table7-1 照射試料の数

| 試験項目                   | 照射条件 | 燃焼度 1<br>(35%) | 燃焼度 2<br>(70%) | 未照射 |
|------------------------|------|----------------|----------------|-----|
| ①ブリスタ試験                | 1    | 1              | 1              |     |
| ②金相試験、SEM/EPMA、熱物性、硬度等 | 1    | 1              | 1              |     |
| ③FP ガス放出率測定            | 1    | 1              | —              |     |
| 予備                     | 1    | 1              | —              |     |

### 7.3 照射後試験の実施に当たっての問題点

実施が予定されている照射後試験について、ホット試験施設管理部の 2 施設（燃料試験施設及び WASTEF）において対応可能であるかの検討を行った。

非破壊試験において、燃料板外観検査、燃料板 X 線検査、燃料板寸法検査、重量・体積検査及び  $\gamma$ スキャニングについて試料形状及びサイズから検討を行い、試料の体積測定を除いては燃料試験施設にある既存の照射後試験技術及び装置において対応可能であると考える。ただし、体積測定については、現在まで照射後試験の経験はなく専用の試験装置の開発が必要となる。

破壊試験については、ブリスタ試験、FP ガス放出率試験、金相試験、SEM 観察、熱物性試験（熱拡散率測定、比熱容量測定、ウラン密度測定、熱膨張率測定）、燃焼度分析、反応熱測定、硬度測定について検討した。

ブリスタ試験については、東海ホットラボ（フルサイズ）及び JMTR ホットラボ（ミニプレート）において試験実績があるが、現在、装置は試験終了にともない撤去されている。燃料試験施設では、試験の経験が無く、装置も整備されてないことから、装置の設計製作から行う必要がある。FP ガス放出率試験については、燃料試験施設にある既存の装置（アウトガス分析装置）を用いて対応可能かどうかの検討を行ったが、本装置は、希ガス（He、Kr、Xe）の測定を対象としたものであり、ヨウ素の測定は困難である。そのため、ヨウ素の測定を主眼とした場合には、装置の新規開発または既存装置の改良が必要となる。その他の破壊試験の金相試験、SEM 観察、熱物性試験（熱膨張率測定を除く）、硬度試験、反応熱測定については、燃料試験施設の既存の装置にて対応可能であると考えられるが、U-Mo 燃料照射後試験の実績がないため試料調製、試験条件等、十分なモックアップ試験が必要となる。特に熱物性試験においては、試料状態・形状については調査・検討が必要であり、被覆材を剥がし芯材のみの試料を測定する場合には、試料調製方法についての検討が必要となる。熱膨張率測定は、JMTR ホットラボにおいて未照射の試験実績はあるが、照射済試料での経験が無く、装置も無いことから、装置の設計製作及び試験技術の確立が必要である。また、燃焼度分析についても、U-Mo 燃料の実績がないため、試料調製、未照射試料でのモックアップ等が必要であるが WASTEF にて対応可能であると考えている。

燃料試験施設及び WASTEF における照射後試験の問題点等を Table7-2 に示す。新規装置の製作が必要な試験項目は、体積検査、ブリスタ試験、FP ガス放出率試験及び熱膨張率測定であり、試験を実施する場合には、早期に検討が必要となる。高額な予算を必要とする装置の新

規製作、また、試験片作製、試料調製が困難な熱物性試験については、再度、試験の重要性についての検討並びに文献調査の必要がある。さらに、各試験項目においても U-Mo 燃料における試験、試料調製等の実績がないため、十分なモックアップ試験が必要である。その他、照射後試験を実施するにあたり、試料取り扱い治具（非破壊試験時のアタッチメント等）、専用切断機等の検討及び製作が必要となる。

試験装置及び技術的検討の他に、燃料試験施設及び WASTEF において U-Mo 燃料を取扱うための核燃料物質の使用に係わる許認可変更、新規に実施する試験についても許認可変更の対象となる可能性があるため変更申請を考慮する必要がある。

Table7-2 U-Mo 燃料照射後試験と実施に当たっての問題点

|       | 試験項目                     | 現 状                  | 試 験 要 領  |
|-------|--------------------------|----------------------|--|
| 非破壊試験 | 燃料板外観検査                  | 可                    | (1)目視検査: 双眼鏡、目視等によって燃料板表面状況について観察<br>(2)写真撮影: 燃料板表裏2面、特異部  |
|       | X線検査                     | 可                    | 試料サイズ(20W×60L×1.27t)   |
|       | 燃料板寸法検査                  | 可                    | (1)全長及び全幅測定: 特に問題なし<br>(2)厚み測定: マイクロメータでのポイント測定なら可能(精度に問題有り)<br>連続測定の場合専用装置の製作が必要  |
|       | 重量測定                     | 可                    | 電子天秤にて測定   |
|       | 体積測定                     | 新規装置要                | 測定装置の製作が必要   |
|       | γスキャニング                  | 可                    | 長手方向及び幅方向について連続スキャン<br>(スペクトル測定及びステップ測定可)  |
| 破壊試験  | ブリスタ試験                   | 新規装置の製作要             | ブリスタ試験装置の設計・製作要<br>燃料試験施設で取り扱うために許認可変更が必要<br>・未照射燃料の試験は必要<br>(1)ブリスタ試験(東海ホットラボにてアルミニナイト燃料PIE要領)<br>・試験温度は、300°C～450°Cまでを50°C間隔とし、450°C～550°Cまでを、25°C間隔とする。<br>(2)外観観察<br>(3)寸法測定 |
|       | FPガス放出率測定<br>(ヨウ素、クリプトン) | 装置の改良<br>または新規装置の製作要 | ヨウ素を測定する場合には、装置の改良、または新規測定装置の製作要<br>燃料試験施設既存のアウトガス分析装置にて約2000°Cまで昇温可能<br>昇温時及びホールド時のHe、Kr、Xe等希ガスの放出量測定可能<br>(通常、冷却期間90日、冷却期間が短い場合発生量の確認要)<br>試料Wカプセル寸法(内径: 18mm φ、高さ: 29mm)      |
|       | 燃焼度測定                    | 可                    | (1)試料採取: 超音波ドリル(直径約1mm φ)<br>(2)化学分析用試料調製<br>(3)化学分析(WASTEF)<br>未照射試料での確認試験要   |
|       | 金相試験                     | 可                    | 未照射試料による研磨・エッティング等の条件だし要<br>試料調製<br>(1)光学顕微鏡による観察<br>(2)SEM観察<br>(3)EPMAによる表面元素分析  |
|       | X線回折                     | 可                    | 金相試験用埋め込み試料にて測定可能<br>未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |
|       | 熱拡散率測定                   | 可                    | 試料状態、試料調製法の検討<br>熱物性測定では、未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |
|       | 熱容量測定                    | 可*                   | 試料状態、試料調製法の検討、装置開発中<br>熱物性測定では、未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |
|       | 熱膨張率測定                   | 新規装置の製作要             | 装置の設計・製作要、試料状態の検討<br>熱物性測定では、未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |
|       | 密度測定                     | 可                    | 試料状態の検討、微小密度開発中  |
|       | 硬度測定                     | 可                    | 金相試験用埋め込み試料にて測定可能<br>未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |
|       | 反応熱測定                    | 可*                   | 試料形状の検討(原理的には、ペレット熱容量測定装置で測定可能)<br>未照射燃料の測定が必要(レファレンス)   |

可\*: 試験装置は既存のもので対応可能と思われるが、実績無し

## 8. 再処理性

### 8.1 U-Mo 燃料再処理

仏国 AREVA 社は未照射燃料を用いた U-Mo 燃料の再処理性確認試験研究の成果をもとに、U-Mo 燃料は軽水炉燃料のラアーグ再処理施設で再処理可能としている。具体的には、U-Mo 燃料の溶解工程において生成する Al、Mo などの沈殿生成の問題は、硝酸の溶解条件を最適化することと、U-Mo 燃料の溶解液を軽水炉燃料の溶解液で 200 倍程度に希釀することにより解決できると考えている。この希釀率は再処理を実施する施設の  $^{235}\text{U}$  濃度制限、Al の硝酸水溶液中の溶解度 (40g/L) などにより決まるとしている。U-Mo 燃料を再処理する際の設備として、燃料受入・貯蔵工程や前処理工程では、軽水炉燃料とは形状の異なる研究炉燃料集合体をハンドリングする遠隔機器及びバスケットの一部改造が必要となる。

- (1) 溶解工程では処理量、溶解速度、被覆材などが軽水炉燃料の場合と異なるため溶解条件の適合化が必要である。U-Mo<sub>5</sub> や U-Mo<sub>9</sub> (塊状、粉末状) の溶解試験の結果では、約 65°C で燃料の溶解が開始し、水素ガスの発生は特に無く、U に対する Mo の割合が増加すると溶解速度は低下している。燃料の溶解は沸騰硝酸を用い、溶解後の硝酸濃度は 3.5N に調整する。
- (2) 抽出分離工程では、前述の通り U-Mo 燃料溶解液を軽水炉燃料の溶解液で 200 倍程度に希釀することで Mo 濃度を溶解度より十分低い濃度条件で処理することが可能となり、沈殿物生成などの問題を回避できる。また、商業ベースの軽水炉燃料の再処理施設を利用することにより、U-Mo 燃料専用の再処理施設を新たに設置することの経済性の問題を解決することができるとされている。U-Mo 燃料を再処理することによる高レベル廃液中の FP に対する Mo 割合の増加はガラス固化体の物性に特に影響しないとしている。

米国では、1950 年代に ORNL などにおいて PUREX 法による発電炉用 U-Mo 燃料の再処理性が研究されたことがある<sup>5)</sup>。そこでは、U-Mo 燃料溶解液を軽水炉燃料溶解液で希釀する方法ではなく、直接処理する方法が検討された。U-Mo 燃料の溶解挙動や U, Pu の抽出分離挙動について以下の結果が得られている。

- (1) 溶解工程では、燃料中の Mo の含有率が増えるとモリブデン酸(MoO<sub>3</sub>)沈殿生成する。U-3% (w/w) Mo 燃料 (Al 被覆) の場合は、沸騰した 1.8M NaOH-2M NaNO<sub>3</sub> 溶液を用いてあらかじめ Al 被覆材を脱被覆した後、沸騰した 6M 硝酸を用いて U 及び Mo を溶解する。溶解後の U、Mo、硝酸の濃度は、それぞれ 0.6M、0.04M、3-4M である。この溶解条件では、沈殿物の生成などの問題はない。U-10% (w/w) Mo 燃料の場合は、11M 沸騰硝酸により溶解したところ、モリブデン酸沈殿物 MoO<sub>3</sub> が生成し、U が 5~10%、Pu が 2%、それぞれ共沈した。なお、共沈した U、Pu については、モリブデン酸沈殿物を 5M NaOH で溶解した後、硝酸を用いて U、Pu を再溶解することが可能としている。
- (2) 抽出工程では、U-Mo 燃料の硝酸溶解液から U 及び Pu を抽出剤リン酸トリプチル (TBP) を用いて十分回収することが可能である。

## 8.2 U-Mo-Si 燃料再処理

2008 年の RERTR 会議資料によれば U-Mo 燃料にシリコンを添加した燃料の開発が米国等で行われている。U-Mo-Si 燃料の再処理性について、 $U_3Si_2$  燃料に関して米国サバンナリバー研究所が 1980 年頃に小規模再処理試験装置を用いて行った再処理実証試験（溶解工程－抽出工程）、仏国 CEA サクレイ研究所における未照射  $U_3Si_2$  燃料の再処理研究、AREVA 社の再処理性検討結果を基に再処理性可能と考えられる。具体的には U-Mo-Si 燃料を硝酸に溶解する工程で生成するケイ酸重合体 ( $xSiO \cdot 2yH_2O$ ) 沈殿を濾過除去する、あるいは、少量の U-Mo-Si 燃料をアルミナイト燃料や U-Mo 燃料と一緒に溶解し、さらにこの溶解液を軽水炉燃料の溶解液で 200 倍程度に希釈することで再処理可能と考えられる。

## 8.3 U-Mo 燃料加工スクラップ回収

現在、米国では GTRI 計画（研究炉燃料低濃縮化）を進めており、U-10% (w/w) Mo 燃料 (Al 被覆) 加工スクラップからの U 回収プロセス（硝酸溶解－溶媒抽出による U 回収）の設計検討が行われた<sup>6)</sup>。主な検討結果は以下の通りである。

- (1) スクラップ燃料の溶解工程；回分式溶解法。溶解液 (U 濃度: 50-70g/L、硝酸: 1.5-3M) を得るための溶解条件は、初期硝酸濃度 5.5M、100°C、触媒 HF 添加、Mo 沈殿抑制錯化剤 0.5M  $Fe(NO_3)_3$ 。なお、HF は爆発性 U-Zr 金属間化合物の生成抑制剤でもある。
- (2) U 抽出工程；設計目標 (U 回収率は 99.999% 以上、不純物除染係数は  $1 \times 10^8$  以上)。連続多段抽出分離法で回収。有機溶媒は 30% (v/v) TBP/n-ドデカン。遠心抽出器 (段数 : 28 段、抽出段 8 段、不純物洗浄段 8 段、回収段 12 段) 抽出解析コード AMUSE で溶解液、有機溶媒、洗浄剤など流量を設定。これら検討結果については実験による確認が必要であるとしている。

## 8.4 U-Mo 燃料の再処理施設

上述の通り、仏国や米国の技術情報を基に現行 PUREX 法により U-Mo 燃料を再処理することは可能であることが知られた。ここでは、機構の東海再処理施設における U-Mo 燃料の再処理性について施設設備及び施設利用計画の観点に関し検討した。

東海再処理施設が再処理することができる燃料のウラン濃縮度は最高 4 wt% であることから、U-Mo 燃料の受入れ、剪断及び溶解が可能な前処理設備を新たに付加することで U-Mo 燃料の再処理は可能になると考えられる。U-Mo 燃料の溶解液は別途用意する濃縮度が低いウラン溶液（例えば回収ウラン硝酸水溶液など）で希釈した後、東海再処理施設本体に送液し抽出処理を行うことで U 及び Pu を回収することが可能と考えられる。

東海再処理施設の今後の利用計画については、次期中期計画検討にあわせて検討中であるが、今のところ第 2 期中期計画期間が終了する 2014 年度までにふげん MOX 燃料等の再処理を終え、その後は廃止措置に移行することとされている。実際に使用済みの U-Mo 燃料が発生し再処理が必要となるのは、U-Mo 燃料の開発に要する期間や開発後の研究炉燃料として U-Mo に移行に要する期間（第 4 章参照）などを考慮すると 2028 年以降と考えられる。

東海再処理施設での再処理性については、施設設備的には前処理設備を付加することで再処

理は可能と考えられるが、実際に処理すべき使用済 U-Mo 燃料の発生時期を考えると再処理実施対象施設に該当しなくなるものと考えられる。海外再処理施設あるいは六ヶ所再処理施設などが再処理実施対象施設として考えられる。

## 8.5 再処理性のまとめ

U-Mo 燃料の再処理性に関するこれまでの検討結果は以下のとおりである。

- (1) U-Mo 燃料を含む研究炉燃料の再処理性：大型再処理施設（例えば、AREVA 社ラアーグ施設）に集合体形状が異なる研究炉燃料用前処理設備などを設置し、さらに軽水炉燃料で希釈処理することにより再処理することが可能である。U-Mo 燃料の再処理で課題となる Mo 沈殿物の生成については、U-Mo 燃料溶解液を軽水炉燃料溶解液で 200 倍程度に希釈することで Mo 濃度を溶解度より十分低い濃度条件で処理することが可能となる。これによって、抽出分離工程などの沈殿物生成などの問題の回避と U-Mo 燃料専用の再処理施設をつくる経済性の問題を解決できると考えられている。
- (2) 米国などで開発が開始された U-Mo-Si 燃料の再処理性：硝酸溶解工程で生成するケイ酸重合体 ( $x\text{SiO} \cdot 2y\text{H}_2\text{O}$ ) 沈殿を濾過除去する、あるいは、少量の U-Mo-Si 燃料をアルミニド燃料や U-Mo 燃料と一緒に溶解し、この溶解液を軽水炉燃料の溶解液で 200 倍程度に希釈することで再処理可能と考えられる。
- (3) U-Mo 燃料加工スクラップからの U 回収プロセスの設計検討：加工スクラップ燃料を硝酸に溶解した後、TBP 抽出剤を用いて U を回収可能な処理条件を抽出解析コードにより検討している。
- (4) 東海再処理施設での再処理性：施設設備的には前処理設備を付加することで再処理は可能と考えられるが、実際に処理すべき使用済 U-Mo 燃料の発生時期を考えると再処理実施対象施設に該当しなくなるものと考えられる。海外再処理施設あるいは六ヶ所再処理施設などが再処理実施対象施設として考えられる。

## 9. まとめ

U-Mo 燃料の採用の可能性、技術的問題点等を検討することを目的として、U-Mo 燃料の開発状況の調査、U-Mo 燃料の利点及び欠点の整理、安全審査時に必要なデータの検討、U-Mo 燃料の再処理性の調査等を実施した。主な結果を以下に示す。

### (1) 海外における U-Mo 燃料開発の状況

- ①2008 年度時点では、U-Mo 分散型燃料での割れが発生するようなスウェーリングの防止対策として、以下に示す多種多様な研究が開始されているが、決定的な対策が見いだされていない。
- ②U-Mo 分散型燃料における異常なスウェーリング防止対策として、燃料芯材に Si を添加したものが開発されている。その他として、韓国ではアトマイズド燃料粉末の粒径を大きく

した燃料（200～300μm）の照射後試験結果が良好であることから、さらに、大きな粒径（500μm）の燃料が開発されている。

③米国では、Ti や Zr を添加した U-Mo 燃料も研究されている。燃料被覆材の開発においては、米国や仏国で、燃料板のスウェーリング緩和のため、燃料芯材と被覆材の間に Si 層や Zr 層を設けたもの、また、従来から使用している被覆材の材料である Al 合金を 2%～5%Si 添加した Al 合金または Al-Fe-Ni（Al に Fe を 1%、Ni を 1%、Mg を 1% 添加した合金）に変更して、照射する実験が行われている。

#### (2) U-Mo への移行のスケジュール

海外における U-Mo 燃料の開発終了時点から共用運転開始までのスケジュールを検討した結果、各種試験、原子炉に係る安全審査、燃料の製作に係る設工認、燃料の製作、炉心特性試験を合わせて約 11 年と見込まれる。スケジュールは、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料移行時の実績を参考に作成しているため、U-Mo 燃料の導入に当たっては、照射後試験の内容、照射後試験施設の設備能力、燃料製作期間等により、スケジュールの見直しが必要となりうる。

#### (3) 安全審査で必要なデータ

U-Mo 燃料への移行時の安全審査に備えるには、当該燃料の基礎物性データに加えて、照射挙動データが不可欠であるが、これらの取得に関してここ数年間ほとんど進展が見られていない。審査に必要なデータの多くは米国 NRC が発行する予定の Safety Evaluation Report から引用できると期待されるものの、その発行時期は 2010 年以降になる見込みである。

#### (4) 照射計画

前回検討時は JMTR の運転計画が未定という状況のため、JRR-3 にて照射する計画で検討を進めていたが、2011 年 4 月より JMTR が再起動する予定であることから、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料化時の照射計画を参考に JMTR を利用した照射計画の検討を行った。検討の結果、目標とする燃焼度約 70%に達するのは、JRR-3 では、8 サイクル照射後の約 1 年後であるのに対し、JMTR の場合は、これまでの年間 6 サイクルの運転であれば約 1 年後であり、照射期間はあまり変わらないことが分かった。

#### (5) 照射後試験

U-Mo 燃料移行時に安全審査等で必要となるデータを取得するために必要な照射後試験項目等の検討を行なった。前回検討時、照射後試験を実施する施設として燃料試験施設と WASTEF を対象として考えていたが、WASTEF は、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）」において廃止措置を着手するための準備を行う施設として、2009 年度をもって運転を停止することが定められている。これに対して、原子力安全委員会に回答した「原子力の重点安全研究計画（第 2 期）案」では、安全に係る重要な課題を検討する上で重要な施設として有効利用を図るべきであるとの記述もあり、本年開催される独法評価委員会において、正式に決定される。仮に WASTEF が運転停止となってしまうと、WASTEF で可能と考えていた試験をどこで行うか、JMTR ホットラボの利用等、再度検討が必要と考える。

## (6) 再処理性

2008RERTR 会議で報告された米国 GTRI 計画（研究炉燃料低濃縮化）に係わる U-Mo 燃料加工スクラップからの U 回収プロセスの設計検討、米国等が研究炉燃料として開発を進めている U-Mo-Si 燃料の再処理性などについて新たに調査検討した。U-Mo 燃料の再処理性については、U-Mo 燃料溶解液を軽水炉燃料溶解液で希釈することにより沈殿物生成を抑制し再処理することはできる。

以上の調査検討の結果、使用済み U-Mo 燃料の再処理は、軽水炉燃料溶解液で希釈すれば可能であるとのことだが、燃料のスウェーリングの問題は解決されてはおらず、未だ開発中の燃料であることが分かった。このため、現時点においては、試験研究炉用燃料として採用を決定することはできない。今後も海外の開発状況に関する情報収集を継続し、技術的問題点等の解決状況を見極める必要がある。仮に、技術的問題点が解決され U-Mo 燃料の採用を決定した場合、安全審査で必要なデータ取得のための照射試験及び照射後試験並びに許認可手続、燃料の製作及び炉心特性試験までを含めて、約 11 年程度の期間を必要とすることが見込まれる。

## 謝辞

本調査、検討を進めるにあたり、岡田漱平理事を委員長とする「試験炉・研究炉用燃料対策委員会」より貴重なご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) D. Iracane, "Jules Horowitz Reactor and LEU", International Symposium on HEU Minimization in the Civilian Sector, Oslo, Norway, June (2006).
- 2) E. Koonen, "Ongoing Activities at BR2 with Regard to Conversion", 30<sup>th</sup> International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Washington D.C., USA, October (2008).
- 3) S. Kalcheva, E. Koonen and B. Guiot, "Optimized Burnable Absorber for the BR2 Reactor", 30<sup>th</sup> International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Washington D.C., USA, October (2008).
- 4) 研究炉 33 年のあゆみ編集委員会、"研究炉 33 年のあゆみ"、pp.125-127 (1990).
- 5) Blanco, R. E., et al., "Chemical Processing of Power and Research Reactor Fuels at Oak Ridge National Laboratory", Proceedings of AEC Symposium for Chemical Processing of irradiated Fuels, TID-7583(1960).
- 6) Dominique, C. et al., "Scrap Recovery Operations in the Fuel Fabrication Capacity", Proceedings of 2008 RERTR(2008).

## 付録 I 2008 年度 U-Mo 燃料調査分科会委員名簿及び開催状況

### 1. 委員名簿

|       |      |                             |
|-------|------|-----------------------------|
| 主査    | 山下清信 | 研究炉加速器管理部（部長）               |
| 副主査   | 寺門義文 | 研究炉加速器管理部 JRR-3 管理課（課長）     |
| 委員    | 更田豊志 | 安全研究センター（研究主席）              |
|       | 内山軍藏 | 安全研究センター（研究主席）              |
|       | 村山洋二 | 経営企画部（技術主幹）                 |
|       | 井上 猛 | 核不拡散センター 核物質管理室（室長）         |
|       | 菊池博之 | ホット試験施設管理部 実用燃料試験課（課長）      |
|       | 和田 茂 | 研究炉加速器管理部 研究炉利用課（課長）        |
|       | 塙 信広 | 原子炉施設管理部 原子炉更新課（技術副主幹）      |
|       | 山本和喜 | 研究炉加速器管理部 研究炉技術課（技術副主幹）     |
| 兼事務局  | 那珂通裕 | 原子炉施設管理部 技術管理課（技術副主幹）       |
| 兼事務局  | 加藤友章 | 研究炉加速器管理部 JRR-3 管理課         |
| 兼事務局  | 堀口洋徳 | 研究炉加速器管理部 JRR-4 管理課         |
| オブザーバ | 天谷政樹 | 安全研究センター燃料安全評価研究グループ（研究副主幹） |

### 2. 開催状況

|       |                  |
|-------|------------------|
| 第 1 回 | 2008 年 9 月 1 日   |
| 第 2 回 | 2008 年 10 月 31 日 |
| 第 3 回 | 2008 年 11 月 18 日 |
| 第 4 回 | 2008 年 12 月 26 日 |
| 第 5 回 | 2009 年 1 月 30 日  |
| 第 6 回 | 2009 年 2 月 27 日  |

## 付録II 2003年度U-Mo燃料アドホック検討会委員名簿

### 1. 委員名簿

|        |      |                          |
|--------|------|--------------------------|
| リーダー   | 村山洋二 | 研究炉部                     |
| サブリーダー | 楠剛   | 研究炉部研究炉技術管理課             |
| 委員     | 中島邦久 | エネルギーシステム研究部新型燃料燃焼研究グループ |
|        | 仲田祐仁 | ホット試験室ホット試験技術課           |
|        | 西雅裕  | ホット試験室実用燃料試験課            |
|        | 那珂通裕 | 材料試験炉部計画課                |
|        | 山浦高幸 | 材料試験炉部照射第1課              |
|        | 石井敏満 | 材料試験炉部ホットラボ課             |
|        | 和田茂  | 研究炉部JRR-3管理課             |
|        | 根本工  | 研究炉部JRR-4管理課             |
|        | 堀直彦  | 研究炉部研究炉利用課               |
| 兼事務局   | 加藤友章 | 研究炉部JRR-3管理課             |
|        |      |                          |
| オブザーバ  | 清水堅一 | 安全管理室核燃料対策室              |
|        | 天野英俊 | ホット試験室実用燃料試験課            |
|        | 渡辺齊  | 研究嘱託 ((株) 総合技術情報機構)      |

(2003年4月現在)

## 付録III JRR-3 用 U-Mo 燃料仕様の検討

U-Mo 燃料の調査を行うにあたり、JRR-3において現行の  $U_3Si_2$  燃料を U-Mo 燃料に変更する場合の U-Mo 燃料仕様について検討を行った。

### 1. 検討方針

JRR-3 燃料を  $U_3Si_2$  燃料から U-Mo 燃料へ変更し、 $U_3Si_2$  燃料炉心と同等以上の性能（照射性能）を有し、かつ、 $U_3Si_2$  燃料炉心より「燃料 1 体あたりの積算出力」を増加させた U-Mo 燃料炉心の実現可能性を検討した。本検討において、燃料変更の際の U-Mo 燃料体の幾何形状は現行  $U_3Si_2$  燃料体から変更しないものとした。ただし、必要に応じて Cd ワイヤ径の変更を検討した。また、燃料体以外の炉心構成要素は変更しないものとした。

### 2. 検討対象とする U-Mo 燃料仕様

#### (1) Mo 含有率

Mo 含有率は燃料とマトリックスの両立性に影響を与える。Mo 含有率の増加に伴い両立性は向上するが、Mo の中性子吸収効果により中性子束は低下する。照射後試験の結果では、Mo 含有率が 6~10wt% の U-Mo 合金で優れた照射挙動が得られることがわかっている。各国で実施しているミニプレート照射試験では、7wt%Mo と設定している例が多い。以上のことから、Mo 含有率を 7wt%とした。

#### (2) ウラン密度及びウラン濃縮度

ウラン密度は、現行  $U_3Si_2$  燃料から変更させない場合と増加させる場合の両方について検討を実施した。増加させる場合には、米国（アトマイズ法）が採用している①~8.4g/cm<sup>3</sup> 及び仏国（アトマイズ法）が採用している、②7.8 ~8.0 g/cm<sup>3</sup>、③8.5 g/cm<sup>3</sup>、④~7.9 g/cm<sup>3</sup> を参考にして、8 g/cm<sup>3</sup> と設定した。

ウラン濃縮度は、ウラン密度を現行  $U_3Si_2$  燃料から変更させない場合については現行  $U_3Si_2$  燃料と同じ値（19.75%）とした。また、ウラン密度を増加させた場合については、ウラン濃縮度を減少させた場合と現行  $U_3Si_2$  燃料と変更させない場合を検討した。その場合のうちウラン濃縮度を減少させた場合の減少幅は、 $^{235}U$  量を現行  $U_3Si_2$  燃料と同じにした場合（11.85%）と、初期の無限増倍率  $k \cdot inf$  を現行  $U_3Si_2$  燃料と一致させた場合（15.90%）を検討した。

以上より、検討対象とする U-Mo 燃料のウラン密度とウラン濃縮度の組み合わせは、Table III-1 のとおりである。

Table III-1 検討対象とする U-Mo 燃料のウラン密度とウラン濃縮度

| 名称                                | ウラン<br>密度             | ウラン<br>濃縮度 | 備考                                     |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|--|
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料 | 4.8 g/cm <sup>3</sup> | 19.75 %    | 現行燃料                                   |
| U-Mo 燃料[1]                        | 4.8 g/cm <sup>3</sup> | 19.75 %    | ウラン密度、ウラン濃縮度の変更なし                      |
| U-Mo 燃料[2]                        | 8.0 g/cm <sup>3</sup> | 11.85 %    | 現行燃料の <sup>235</sup> U 量と一致させた         |
| U-Mo 燃料[3]                        | 8.0 g/cm <sup>3</sup> | 15.90 %    | 初期の無限増倍率を一致させた                         |
| U-Mo 燃料[4]                        | 8.0 g/cm <sup>3</sup> | 19.75 %    | ウラン密度 8.0 g/cm <sup>3</sup> 、ウラン濃縮度は維持 |

### 3. 炉停止余裕の確保

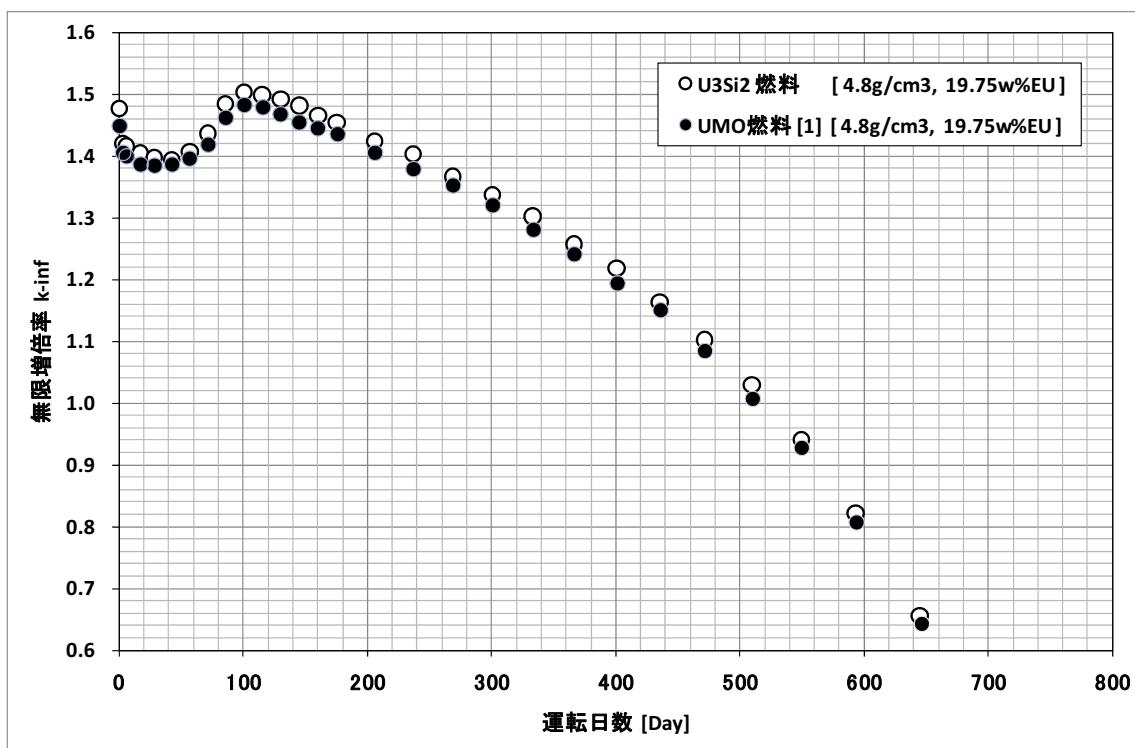
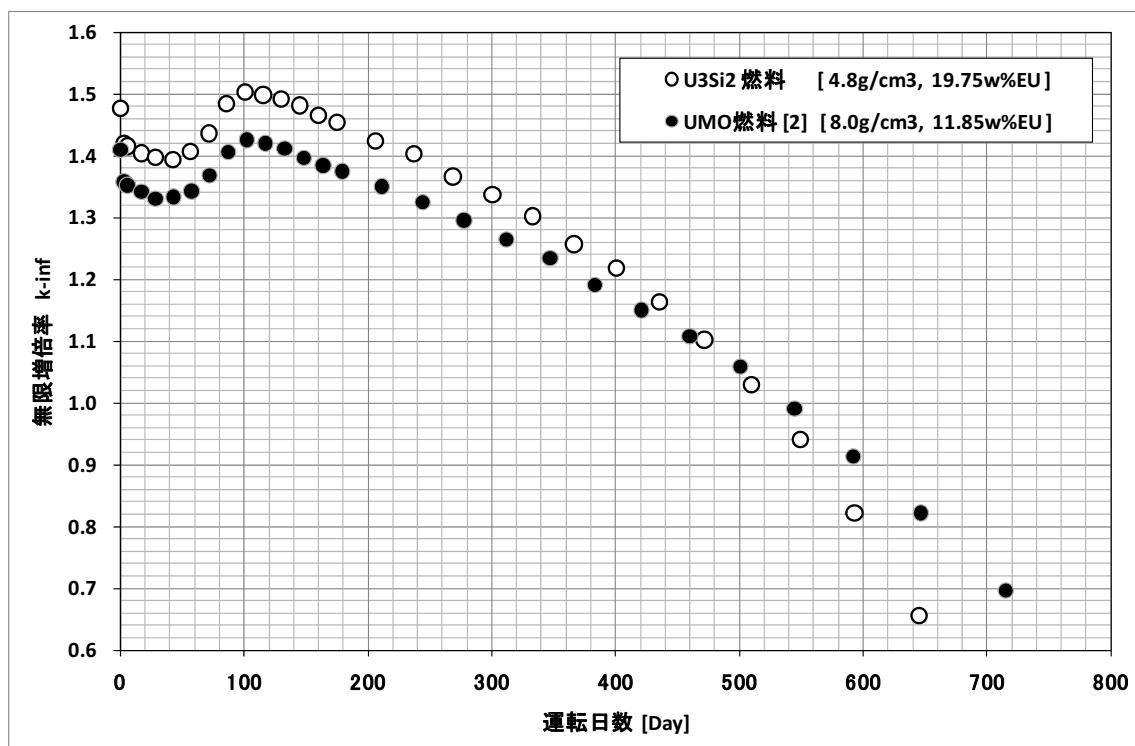
U-Mo 燃料炉心を成立させるには、炉停止余裕を現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料炉心と同等以上にする必要がある。そこで、U-Mo 燃料炉心の炉停止余裕について検討を行った。

#### (1) 過剰反応度最大時における炉停止余裕の確保

U-Mo 燃料炉心を成立させるためには、U-Mo 燃料炉心の炉停止余裕の値を、現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料に比べて同等以上にする必要がある。つまり、U-Mo 燃料炉心の過剰反応度最大値を現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料炉心の過剰反応度に比べて同等以下とする必要がある。

現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料には、可燃性毒物である Cd ワイヤが取り付けられている。燃料の燃焼に伴い Cd ワイヤも燃焼するため、燃料燃焼がすすむにつれて過剰反応度が増大し、初期炉心よりも過剰反応度が増加する。本検討では、U-Mo 燃料に対しても Cd ワイヤを取り付けることを前提としているため、Cd ワイヤの燃焼による過剰反応度の変化を考慮する必要がある。

U-Mo 燃料炉心の過剰反応度最大値を把握するには、燃料燃焼による過剰反応度の変化の様子を確認する必要がある。そこで、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料及び U-Mo 燃料[1]～[4]について MVP-BURN コードにより燃焼計算を実施した。計算結果より、U-Mo 燃料[1]～[4]の燃焼特性を U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料の燃焼特性と比較したものを、Fig.III-1、Fig.III-2、Fig.III-3 及び Fig.III-4 にそれぞれ示す。また、各燃料を用いた場合の、初期炉心の無限増倍率と過剰反応度最大時の無限増倍率を Table III-2 に示す。

Fig.III-1 U-Mo 燃料[1]燃焼特性の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料燃焼特性との比較Fig.III-2 U-Mo 燃料[2]燃焼特性の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料燃焼特性との比較

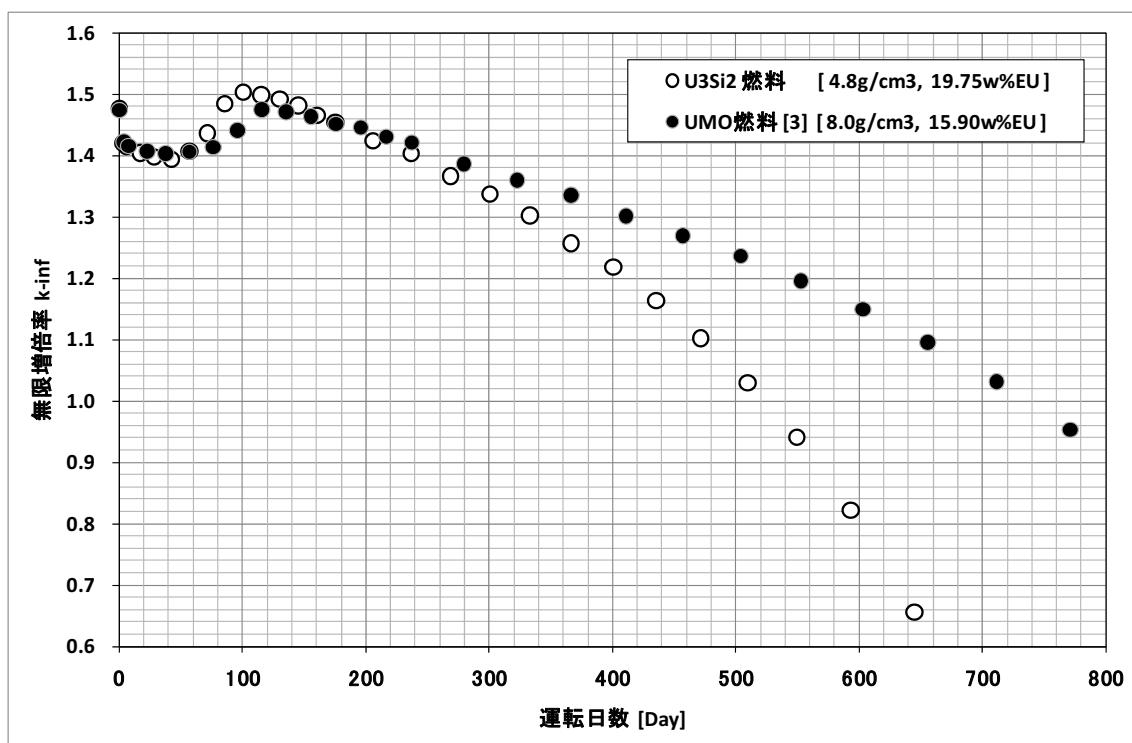
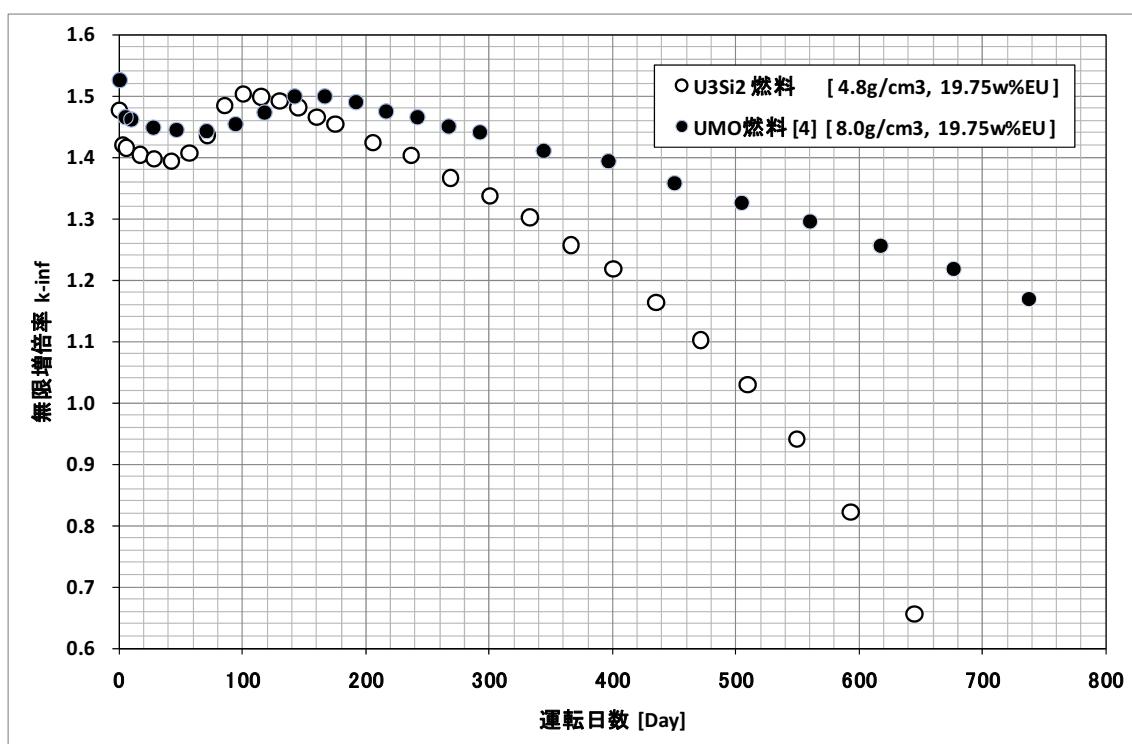
Fig.III-3 U-Mo 燃料[3]燃焼特性の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料燃焼特性との比較Fig.III-4 U-Mo 燃料[4]燃焼特性の U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料燃焼特性との比較

Table III-2 初期炉心及び過剰反応度最大時の無限増倍率

| 名 称                               | 無限増倍率 k-inf |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|
|                                   | 初期炉心        | 過剰反応度最大時  |
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料 | 1.476       | 1.504     |
| U-Mo 燃料[1]                        | 1.449       | 1.482     |
| U-Mo 燃料[2]                        | 1.410       | 1.426     |
| U-Mo 燃料[3]                        | 1.473       | 1.474     |
| U-Mo 燃料[4]                        | 1.525       | (1.499) * |

※U-Mo 燃料[4]では、初期炉心において過剰反応度が最大となるため、最大値ではなく極大値を記載した。

U-Mo 燃料[1]～[4]を用いた場合の炉停止余裕についての検討結果を以下に示す。

#### U-Mo 燃料[1] :

U-Mo 燃料[1]の無限増倍率の値は、初期炉心、過剰反応度最大時とともに、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料の無限増倍率比べてわずかに小さい値となった。(Mo の中性子吸収断面積が Si に比べて大きいため、過剰反応度が小さい値となった。) したがって、U-Mo 燃料[1]は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料に比べて同等以上の炉停止余裕を確保できる。

#### U-Mo 燃料[2] :

U-Mo 燃料[2]の無限増倍率の値は、初期炉心及び過剰反応度最大時ともに、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料を用いた場合に比べて小さい値となった。(Mo の中性子吸収断面積が Si に比べて大きいこと及び <sup>238</sup>U 含有量増大により共鳴吸収が大きいことにより、過剰反応度が小さい値となった。) したがって、U-Mo 燃料[2]は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料に比べて同等以上の炉停止余裕を確保できる。

#### U-Mo 燃料[3] :

U-Mo 燃料[3]の無限増倍率の値は、初期炉心では U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料を用いた場合とほぼ一致し、過剰反応度最大時では U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料を用いた場合に比べて小さい値となつたしたがって、U-Mo 燃料[3]は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料に比べて同等以上の炉停止余裕を確保できる。

#### U-Mo 燃料[4] :

U-Mo 燃料[4]の無限増倍率の値は、初期炉心において最大となった。また、その値は U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料の無限増倍率最大値に比べて大きい値となった。したがって、U-Mo 燃料[4]では、炉停止余裕が不足し、このままでは炉心として成立しない。

## (2) Cd ワイヤの径の増大による炉停止余裕の確保

(1) で述べたように、U-Mo 燃料[4]を用いた場合は、炉停止余裕が確保することができない。したがって、U-Mo 燃料[4]を用いた炉心を成立させるためには、燃焼初期の過剰反応度を抑制する必要がある。そこで、U-Mo 燃料[4]の燃焼初期の反応度を抑制するために、可燃性毒物である Cd ワイヤの径の増大について検討した。U-Mo 燃料[4]について、Cd ワイヤの

径を現行の 0.4mm から増大 (0.6mm、0.8mm 及び 1.0mm) させた場合の燃焼解析を MVP-BURN コードにより実施した。解析結果を Fig.III-5 に示す。

Cd ワイヤの直径を増大させると、初期炉心の無限増倍率が抑制された。しかしながら、無限増倍率最大値は、0.6mm、0.8mm 及び 1.0mm いずれの場合も現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料よりも大きな値となってしまった。したがって、U-Mo 燃料[4]は、Cd ワイヤの径を増大させても燃料として使用することはできない。(以降、U-Mo 燃料[4]は、検討の対象外とする。)

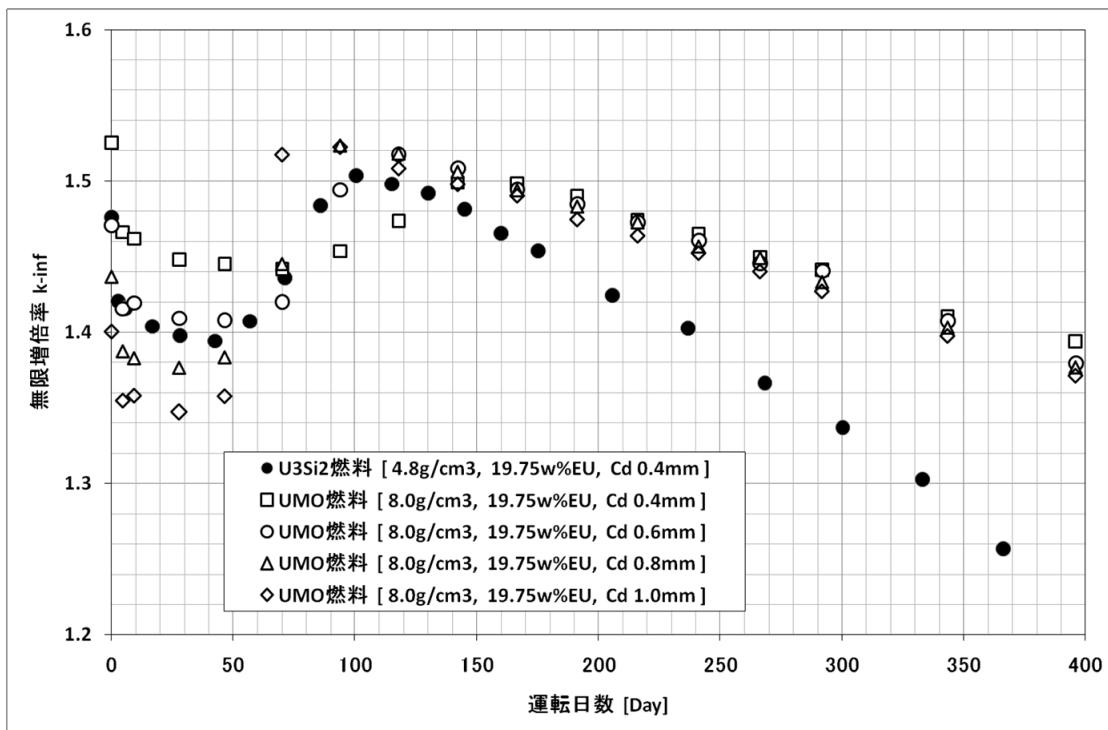


Fig.III-5 U-Mo 燃料[4]の Cd ワイヤ径を増大させた場合の燃焼特性

#### 4. 燃料 1 体あたりの積算出力増大の可能性

燃料 1 体あたりの積算出力を増大させるためには、長期間にわたり過剰反応度を高い値に維持する必要がある。長期間にわたり過剰反応度を高い値に維持できれば、過剰反応度不足を起因とする燃料交換の頻度が減少し、燃料 1 体あたりの積算出力を増大させることができる可能性がある。

燃料 1 体あたりの積算出力増大の可能性について、前節の Fig.III-1、Fig.III-2 及び Fig.III-3 により検討した。検討結果を以下に示す。

現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料の炉心滞在期間は、原子炉出力 20MW 換算で約 380 日程度に相当する。U-Mo 燃料[1]、U-Mo 燃料[2]及び U-Mo 燃料[3]の炉心滞在期間を現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料の炉心滞在期間と比較した結果を以下に示す。

U-Mo 燃料[1] :

U-Mo 燃料[1]は、運転日数 0~380 日のすべての期間で、無限増倍率が現行 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料よりもわずかに小さくなつたが、ほとんど差がない。したがって、U-Mo 燃料[1]を

適用した場合、現行  $U_3Si_2$  燃料に比べて「過剰反応度不足を起因とした燃料交換」頻度は同程度（わずかに減少）である。ゆえに、U-Mo 燃料[1]では、燃料 1 体あたりの積算出力は現行  $U_3Si_2$  燃料と同程度となる。

#### U-Mo 燃料[2] :

U-Mo 燃料[2]では、運転日数 0~380 日のすべての期間での無限増倍率が現行  $U_3Si_2$  燃料よりも小さくなつた。したがつて、U-Mo 燃料[2]を適用した場合、現行  $U_3Si_2$  燃料に比べて「過剰反応度不足を起因とした燃料交換」頻度が増加してしまい、燃料 1 体あたりの積算出力は減少してしまつ。ゆえに、U-Mo 燃料[2]では、燃料 1 体あたりの積算出力が  $U_3Si_2$  燃料に比べて減少する。

#### U-Mo 燃料[3]

$U_3Si_2$  燃料の運転日数 380 日における無限増倍率の値（約 1.24）の値を、U-Mo 燃料[3]の燃焼末期（使用済燃料）における無限増倍率の値であると仮定する。U-Mo 燃料[3]について無限増倍率が 1.24 となる運転日数は、Fig.III-3 から読み取ると約 500 日である。したがつて、U-Mo 燃料[3]を適用した場合、燃料 1 体あたりの炉心滞在時間を約 120 日増加させることができると見込みとなる。ゆえに、U-Mo 燃料[3]を適用した場合、燃料 1 体あたりの積算出力を約 1.3 倍 ( $=500/380$ ) にすることができる。ここで、

$$(U\text{-Mo 燃料[3]} \text{ の } ^{235}U \text{ 含有量}) / (U_3Si_2 \text{ 燃料の } ^{235}U \text{ 含有量}) \approx 1.3$$

であることを考慮すると、 $^{235}U$  含有量の増加分とほぼ同等に、燃料 1 体あたりの積算出力を増加可能であることがわかる。

## 5. 照射性能

U-Mo 燃料炉心が  $U_3Si_2$  燃料炉心と同等以上の性能を有することを確認するために、 $U_3Si_2$  燃料、U-Mo 燃料[1]、U-Mo 燃料[2]及び U-Mo 燃料[3]について、SRAC コードにより炉心計算を実施し、各燃料を用いた場合の照射筒領域の中性子束を算出した。照射筒領域（VT-1）、照射筒領域（RG-2）における中性子束を Fig.III-6 及び Fig.III-7 に、示す。

U-Mo 燃料[1]及び U-Mo 燃料[2]を用いた場合は、 $U_3Si_2$  燃料炉心を用いた場合の中性子束とほぼ一致した。また、U-Mo 燃料[3]を用いた場合は、 $U_3Si_2$  燃料炉心を用いた場合の中性子束に比べて、熱中性子束が減少したが、その減少幅はわずかであった。

したがつて、U-Mo 燃料[1]、U-Mo 燃料[2]及び U-Mo 燃料[3]のいずれの燃料を用いた場合でも、現行  $U_3Si_2$  燃料を用いた場合と同程度の照射性能を得ることができる。

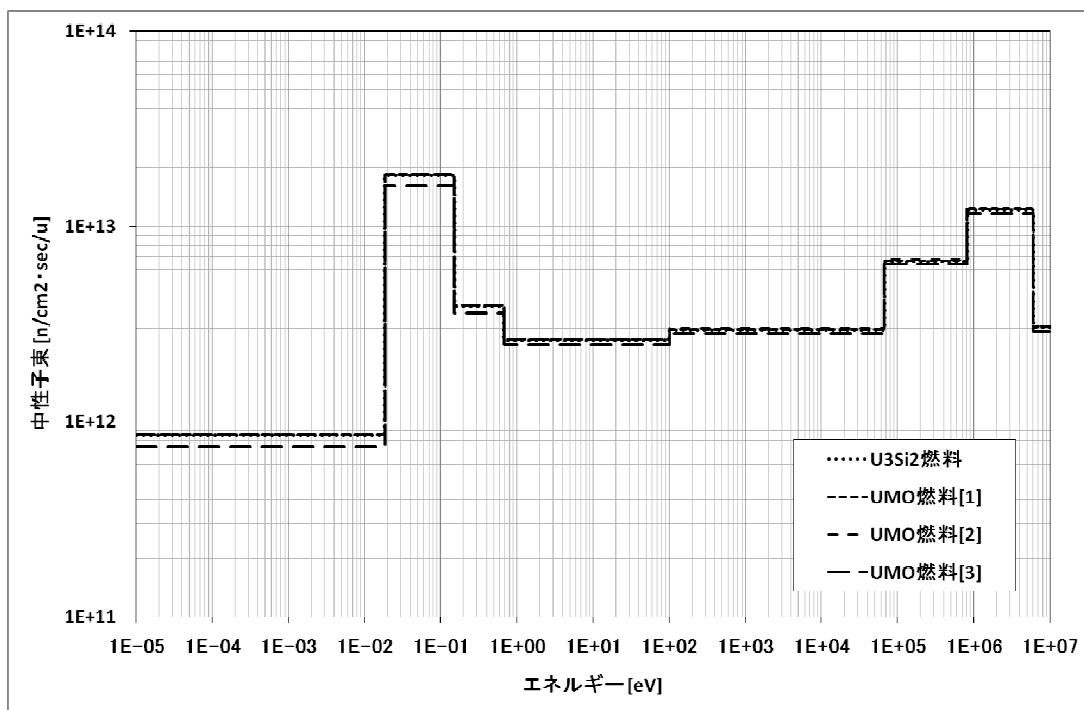


Fig. III-6 照射筒領域（VT-1）の中性子束

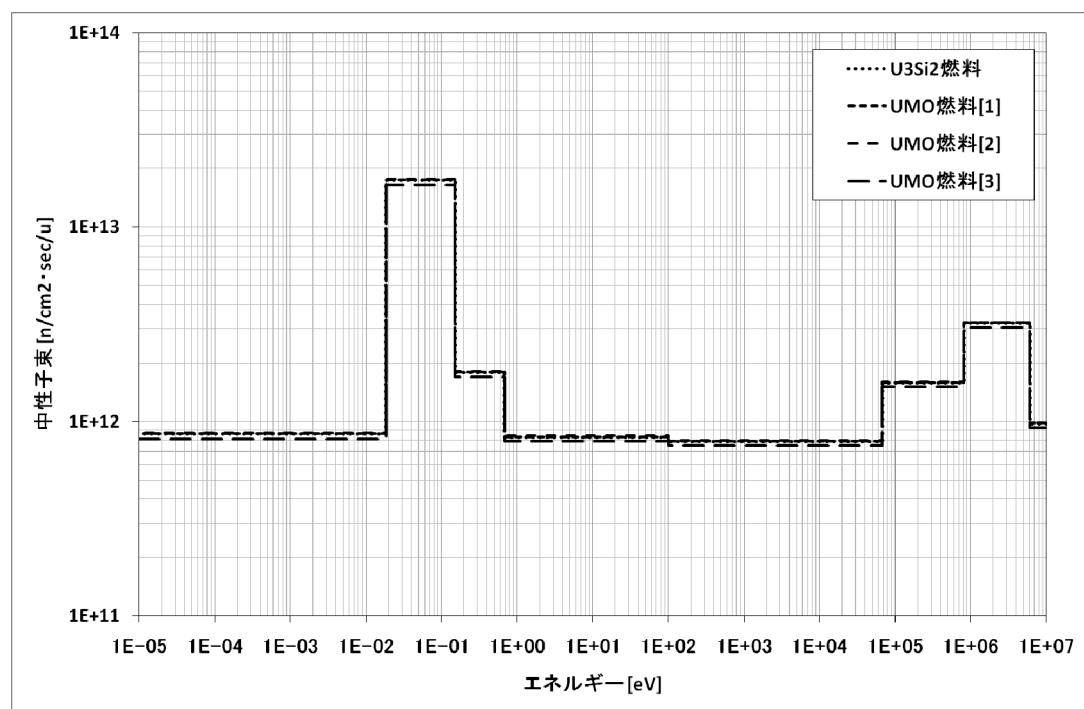


Fig. III-7 照射筒領域（RG-2）の中性子束

## 6. JRR-3 用 U-Mo 燃料仕様

前節までの検討結果をまとめると、Table III-4 のとおりである。

Table III-4 U-Mo 燃料仕様の検討結果

| 名 称        | Cd 径<br>変更 | 炉停止余裕 | 1 体あたりの<br>積算出力 | 照射性能           |
|------------|------------|-------|-----------------|----------------|
| U-Mo 燃料[1] | なし         | 確保できる | 同等<br>(わずかに減少)  | 同等             |
| U-Mo 燃料[2] | なし         | 確保できる | 減少              | 同等             |
| U-Mo 燃料[3] | なし         | 確保できる | 増大<br>(約 1.3 倍) | 同等<br>(わずかに減少) |
| U-Mo 燃料[4] | なし         | 不足    | —               | —              |
|            | あり         | 不足    | —               | —              |

以上より、JRR-3 用 U-Mo 燃料仕様として、以下の 2 ケースを提案する。

<燃料仕様 ケース 1 (U-Mo 燃料[1]) >

ウラン密度 : 4.8 g/cm<sup>3</sup>  
ウラン濃縮度 : 19.75%  
燃料芯材組成 : UMo (Mo7w%) -Al  
燃料粒子製造法 : アトマイズ法  
燃料板枚数 : 標準型 21 枚、フォロワ型 17 枚  
Cd ワイヤ直径 : 0.04cm  
Cd ワイヤ本数 : 標準型 21 本×2 (両側)、フォロワ型 17 本×2 (両側)  
燃料ミート厚さ : 0.051cm  
水ギャップ厚さ : 標準型 0.235cm、フォロワ型 0.24cm

<燃料仕様 ケース 2 (U-Mo 燃料[3]) >

ウラン密度 : 8.0 g/cm<sup>3</sup>  
ウラン濃縮度 : 15.90%  
燃料芯材組成 : UMo (Mo7w%) -Al  
燃料粒子製造法 : アトマイズ法  
燃料板枚数 : 標準型 21 枚、フォロワ型 17 枚  
Cd ワイヤ直径 : 0.04cm  
Cd ワイヤ本数 : 標準型 21 本×2 (両側)、フォロワ型 17 本×2 (両側)  
燃料ミート厚さ : 0.051cm  
水ギャップ厚さ : 標準型 0.235cm、フォロワ型 0.24cm  
(燃料 1 体あたりの積算出力 : U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 燃料の 1.29 倍)

## 付録IV JMTR 用 U-Mo 燃料仕様の検討

現在、JMTR では  $U_3Si_2$  燃料による燃料配置の異なった二つの炉心配置が許可されている。1つは、LEU 炉心と呼ばれる標準燃料 22 体（2 バッチ）及び燃料フォロワ 5 体（1 バッチ）で構成される炉心配置で、通常約 25 日（約 1,240MWd）の運転を行う。この炉心配置での燃料要素平均の最高燃焼度は 50%である。もう一つは、改良 LEU 炉心と呼ばれる標準燃料 24 体（3 バッチ）及び燃料フォロワ 5 体（2 バッチ）で構成される炉心配置で、通常約 30 日（約 1,490MWd）の運転を行う。この炉心配置での燃料要素平均の最高燃焼度は 60%である。

今回、U-Mo 燃料の調査を行うにあたり、JMTRにおいて現行の  $U_3Si_2$  燃料を U-Mo 燃料に変更する検討を併せて行うこととした。

### 1. 検討方針

JRR-3 燃料における検討方針と同様に、JMTR 燃料を  $U_3Si_2$  燃料から U-Mo 燃料へ変更し、U-Mo 燃料の利点の一つである高ウラン密度を積極的に利用することによって  $U_3Si_2$  燃料炉心と同等以上の性能を有し、かつ、 $U_3Si_2$  燃料炉心より「燃料 1 体あたりの積算出力」を増加させた U-Mo 燃料炉心の実現可能性を検討する。U-Mo 燃料の幾何形状は、現行  $U_3Si_2$  燃料から変更しないものとする。また、今回の検討では JMTR における現行  $U_3Si_2$  燃料に関する核的制限値の変更の検討は行わないため、現行の核的制限値の範囲内における検討とする。核的な解析は、JMTR の炉心管理に用いている SRAC コードシステムを使用して、燃料板の格子燃焼計算とその計算結果を用いた炉心計算によって実施することとした。炉心配置は直近の第 165 サイクルにおける炉心配置（改良 LEU 炉心）を用いた。

### 2. 検討対象とする U-Mo 燃料仕様

#### (1) Mo 含有率

付録IIIで述べた JRR-3 燃料における Mo 含有率と同様の理由により、JMTR 燃料の Mo 含有率を 7wt%に設定した。

#### (2) ウラン密度及びウラン濃縮度

付録IIIで述べた JRR-3 燃料と同様に、ウラン密度を現行  $U_3Si_2$  燃料から変更させない場合（4.8g/cm<sup>3</sup>）と増加させる場合（8.0g/cm<sup>3</sup>）について検討を実施した。

ウラン濃縮度は、ウラン密度を現行  $U_3Si_2$  燃料から変更させない場合については現行  $U_3Si_2$  燃料と同じ値（19.75%）とし、ウラン密度を増加させた場合については現行  $U_3Si_2$  燃料から変更させない場合（19.75%）と、<sup>235</sup>U 量を現行  $U_3Si_2$  燃料と同じにした場合（11.85%）を検討した。JMTR における検討対象とする U-Mo 燃料のウラン密度とウラン濃縮度の組み合わせを TableIV-1 に示す。

### 3. U-Mo 燃料に関する解析結果

#### (1) U-Mo 燃料板の格子燃焼計算

U-Mo 燃料[1]、[2]、[3]及び比較対象としての現行  $U_3Si_2$  燃料の燃料板の格子燃焼計算（14

ステップ) を行い、各燃焼度ステップにおける燃焼日数、無限像倍率  $k\text{-}inf$  及び燃料板中の各核種の個数密度を算出した。各核種の個数密度はこの後の炉心計算のために用いられる。

各 U-Mo 燃料の燃料板の燃焼日数に対する無限像倍率  $k\text{-}inf$  の変化を Fig.IV-1、Fig.IV-2 及び Fig.IV-3 に示す。

#### (2) U-Mo 燃料炉心の炉心計算

(1) 項で得られた各 U-Mo 燃料及び  $U_3Si_2$  燃料の燃料板中の各核種の個数密度から燃料要素の格子計算を行うことによって群定数を算出し、各 U-Mo 燃料炉心及び現行  $U_3Si_2$  燃料炉心の炉心計算を行い、それぞれの炉心における中性子束や過剰反応度や停止余裕等を算出した。

各 U-Mo 燃料炉心における炉心計算結果を TableIV-2 に示す。また、現行  $U_3Si_2$  燃料炉心と比較した各 U-Mo 燃料炉心における高速中性子束 ( $>1MeV$ ) 及び熱中性子束 ( $<0.683eV$ ) の変化を Fig.IV-4、Fig.IV-5 及び Fig.IV-6 に示す。

#### (3) U-Mo 燃料[1]の解析結果

U-Mo 燃料[1]の燃料板の格子燃焼計算において、無限像倍率が  $U_3Si_2$  燃料より僅かに減少しているが、ほぼ同等の結果が得られた。

U-Mo 燃料[1]炉心の炉心計算では、過剰反応度や炉停止余裕等が  $U_3Si_2$  燃料炉心より僅かに減少しているが、記載した核的制限値は満足している。中性子束に関しては、高速中性子束は全体的に  $U_3Si_2$  燃料炉心より僅かに増加しているが、熱中性子束は反射体領域では僅かに増加しているが、燃料領域では僅かに減少しており、中性子スペクトルが  $U_3Si_2$  燃料炉心より僅かに硬化することになる。

これらは Si より中性子吸収断面積が大きい Mo の影響によるものと考えられる。また、U-Mo 燃料[1]炉心は  $U_3Si_2$  燃料と比較して、「燃料 1 体あたりの積算出力」の増加を見込むことはできない。

#### (4) U-Mo 燃料[2]の解析結果

U-Mo 燃料[2]の燃料板の格子燃焼計算において、 $U_3Si_2$  燃料より燃焼初期では無限像倍率が減少しているが、燃焼末期では無限像倍率の減少幅は小さくなっており、また燃焼ステップごとに少しづつ燃焼日数が増加している。

U-Mo 燃料[2]炉心の炉心計算では、過剰反応度や炉停止余裕等が U-Mo 燃料[1]炉心よりも減少しているが、記載した核的制限値は満足している。中性子束に関しては、高速中性子束が全体的に増加するとともに、燃料領域の熱中性子束が減少し、中性子スペクトルが硬化する傾向が U-Mo 燃料[1]炉心より強まる。

これらは、U-Mo 燃料[1]炉心より Mo 量が増加したためと、 $^{238}U$  量が増加したことによる共鳴吸収のためと考えられる。 $^{238}U$  量の増加による Pu の燃焼の寄与はこの検討の範囲内ではまだ小さく、「燃料 1 体あたりの積算出力」の増加を見込めないばかりか、現行  $U_3Si_2$  燃料炉心よりも運転日数が減少する結果となった。

#### (5) U-Mo 燃料[3]の解析結果

U-Mo 燃料[3]の燃料板の格子燃焼計算において、 $U_3Si_2$  燃料より燃焼日数に対する無限像倍率の減少が小さく、燃焼ステップごとに大きく燃焼日数が増加している。

U-Mo 燃料[3]炉心の炉心計算では、記載した全ての核的制限値を越える結果となった。中性子束に関しては、高速中性子束及び熱中性子束ともに全体的に減少している。特に燃料領域での熱中性子束は数十%程度減少している。

これらは、他の炉心から  $^{235}\text{U}$  量が約 1.67 倍に増加していることによる。このため、運転サイクルあたりの運転日数の増加等、本検討の目的である「燃料 1 体あたりの積算出力」を増加することによって、燃料要素の高燃焼度化を行えれば改善する可能性は十分あると考えられる。

しかし、何らかの場合に初装荷炉心を構成する必要が生じたとき、LEU 炉心による初装荷炉心となるが、U-Mo 燃料[3]の仕様では炉心装荷  $^{235}\text{U}$  量の 11kg の制限値を満足することができない。

#### 4. JMTR 用 U-Mo 燃料仕様

U-Mo 燃料の利点の一つである高ウラン密度を利用することによって、「燃料 1 体あたりの積算出力」を増加させる可能性の検討を行ったが、各 U-Mo 燃料の燃料板の格子燃焼計算と炉心計算の結果から、現行の核的制限値の範囲内では、そのような結論を得ることはできなかった。このため、JMTR における U-Mo 燃料仕様として、現行  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料と同様の仕様で、同等の性能を示した U-Mo 燃料[1]を基本とする燃料仕様を選択することを提案する。

ただし、ウラン密度 4.8g/cm<sup>3</sup> は U-Mo 燃料では一般的な仕様ではないため、何らかの理由でこのウラン密度の採用が困難な場合は、U-Mo 燃料[2]を基本として、現行  $\text{U}_3\text{Si}_2$  燃料炉心と比較した場合の過剰反応度等の減少を補うためにウラン濃縮度を 11.85%から多少増加させる仕様を代案として提案する。この場合、LEU 炉心による初装荷炉心においても炉心装荷  $^{235}\text{U}$  量の制限値 11kg を満足させるためには、Mo 含有率 7wt%、ウラン密度 8.0g/cm<sup>3</sup> の条件下では約 12.5%のウラン濃縮度となる。

これらの JMTR における U-Mo 燃料仕様を Table IV-3 に示す。

今回の検討は U-Mo 燃料の開発段階におけるものであり、今後の開発状況に応じて燃料の仕様を見直す必要がある。また、さらに最適な燃料仕様の検討を行うためには、今回行わなかつた炉心燃焼計算等の核的な解析や熱的な解析、核的制限値の変更の検討を実施する必要があると考える。

TableIV-1 JMTRにおける検討対象とする U-Mo 燃料のウラン密度とウラン濃縮度

| 名 称                               | ウラン<br>密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | ウラン<br>濃縮度<br>(%) | 備考                         |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料 | 4.8                            | 19.75             | 現行燃料                       |
| U-Mo 燃料[1]                        | 4.8                            | 19.75             | ウラン密度、濃縮度を変更させない。          |
| U-Mo 燃料[2]                        | 8.0                            | 11.85             | <sup>235</sup> U 量を変更させない。 |
| U-Mo 燃料[3]                        | 8.0                            | 19.75             | ウラン濃縮度を変更させない。             |

TableIV-2 JMTRにおける U-Mo 燃料炉心における炉心計算結果

| 名 称                               | 運転初期 (コールドクリーン状態)                  |        |                     |                    | 運転末期               |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                                   | 炉心装荷<br><sup>235</sup> U 量<br>(kg) | 炉停止余裕  | ワンロッド<br>スタック<br>余裕 | 過剰反応度<br>(% Δ k/k) | 過剰反応度<br>(% Δ k/k) |
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 燃料 | 9,629                              | 0.893  | 0.983               | 12.32              | 3.78               |
| U-Mo 燃料[1]                        | 9,629                              | 0.888  | 0.977               | 11.85              | 3.29               |
| U-Mo 燃料[2]                        | 9,629                              | 0.867  | 0.954               | 9.47               | 0.78               |
| U-Mo 燃料[3]                        | 16,048                             | 0.952  | 1.041               | 16.61              | 7.77               |
| 核的制限値                             | 11 以下                              | 0.9 以下 | 未臨界                 | 15 以下              | —                  |

TableIV-3 JMTRにおける U-Mo 燃料仕様

| 名 称         | ウラン<br>密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | ウラン<br>濃縮度<br>(%) | 炉心装荷<br><sup>235</sup> U 量<br>(kg) | 備考          |
|-------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------|
| U-Mo 燃料[1]  | 4.8                            | 19.75             | 9,629                              |             |
| U-Mo 燃料[2]  | 8.0                            | 11.85             | 9,629                              |             |
| U-Mo 燃料[2]' | 8.0                            | 12.50             | 10,965                             | 核的な解析は今回未実施 |

(Mo 含有率 7wt%)

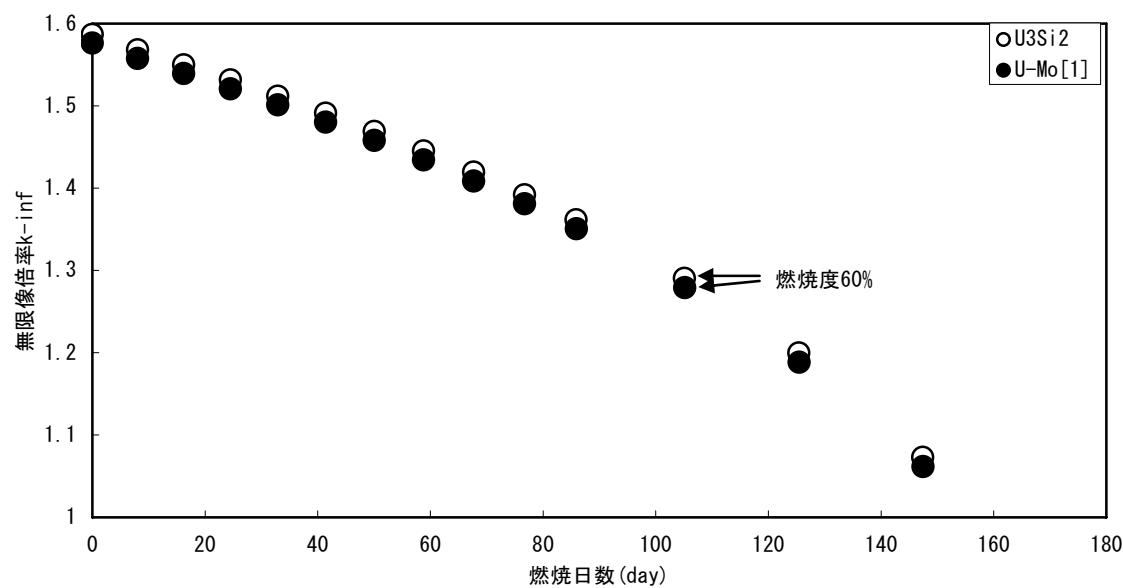


Fig.IV-1  $\text{U}-\text{Mo}$  燃料[1]の燃料板の燃焼日数に対する無限像倍率  $k\text{-}inf$  の変化

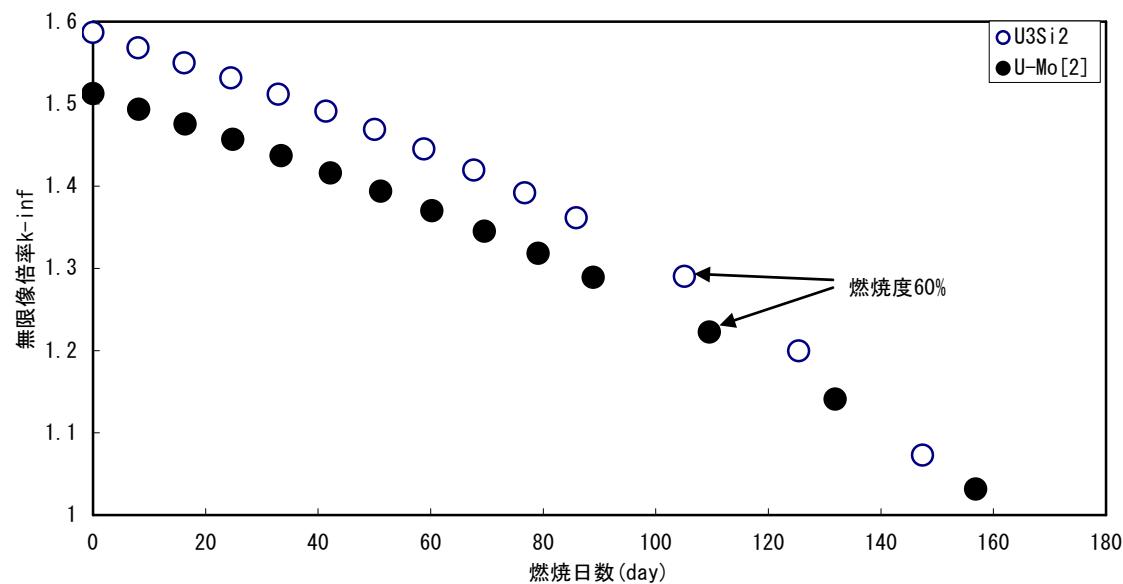


Fig.IV-2  $\text{U}-\text{Mo}$  燃料[2]の燃料板の燃焼日数に対する無限像倍率  $k\text{-}inf$  の変化

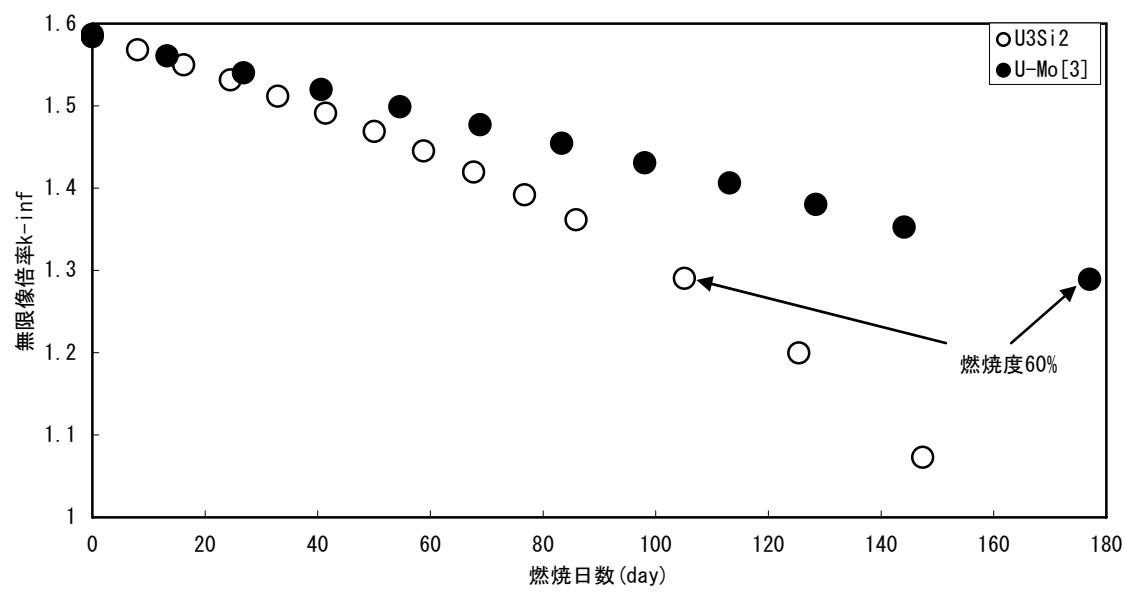
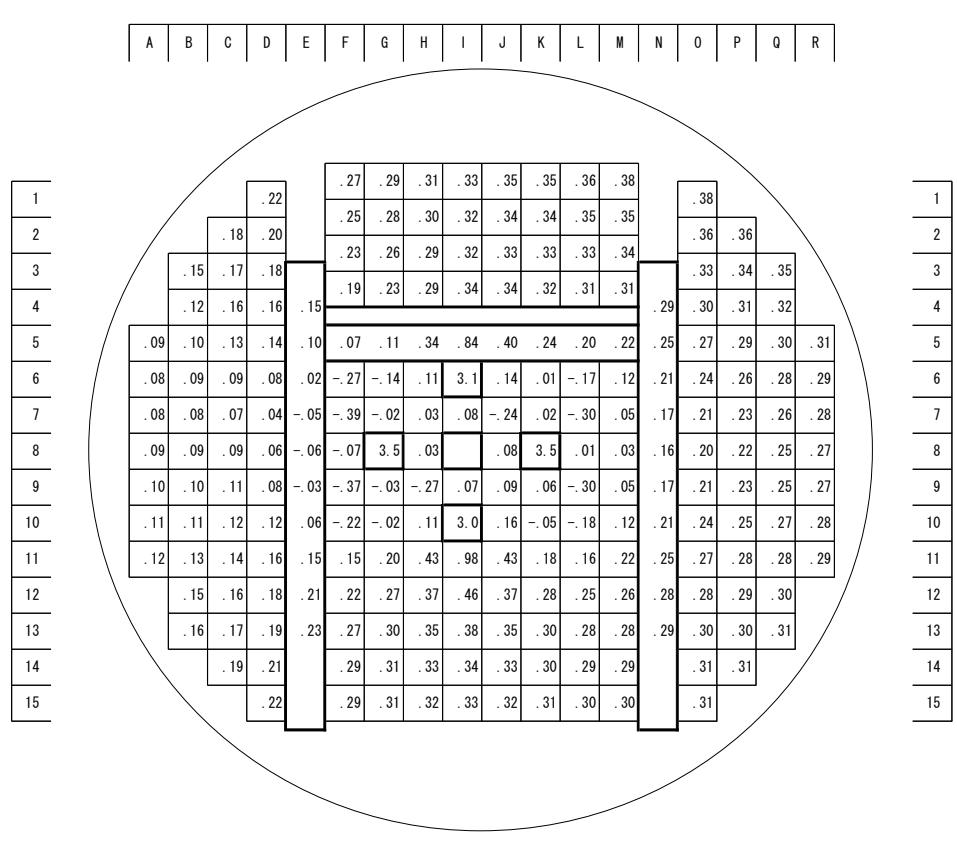
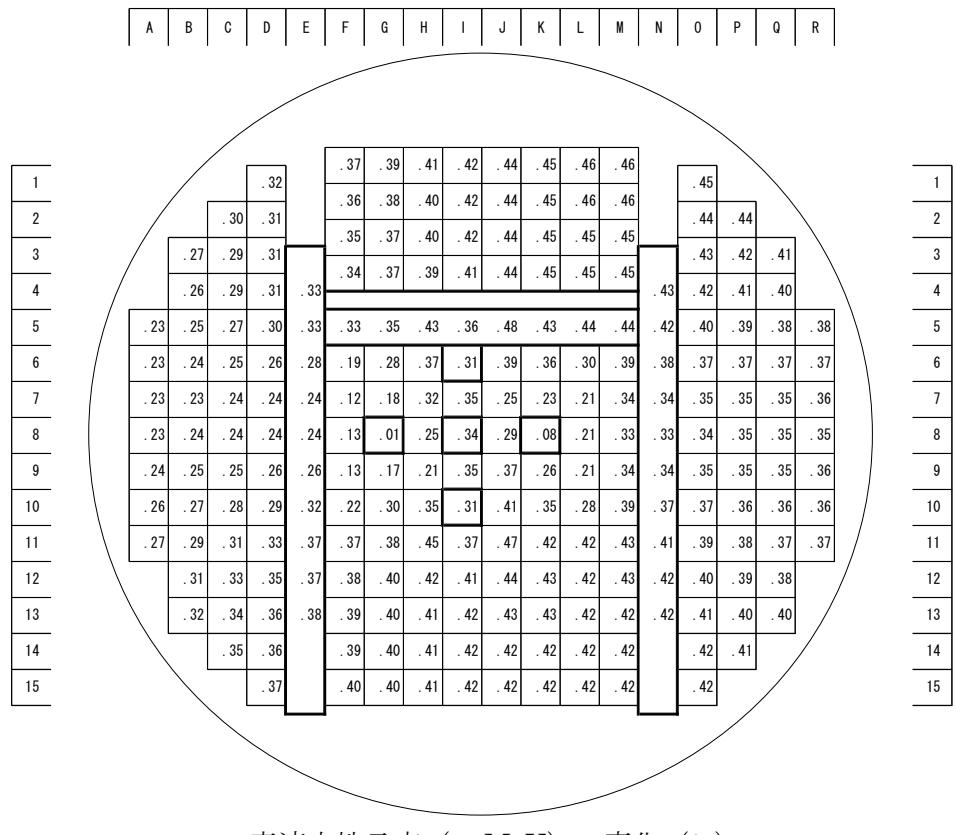
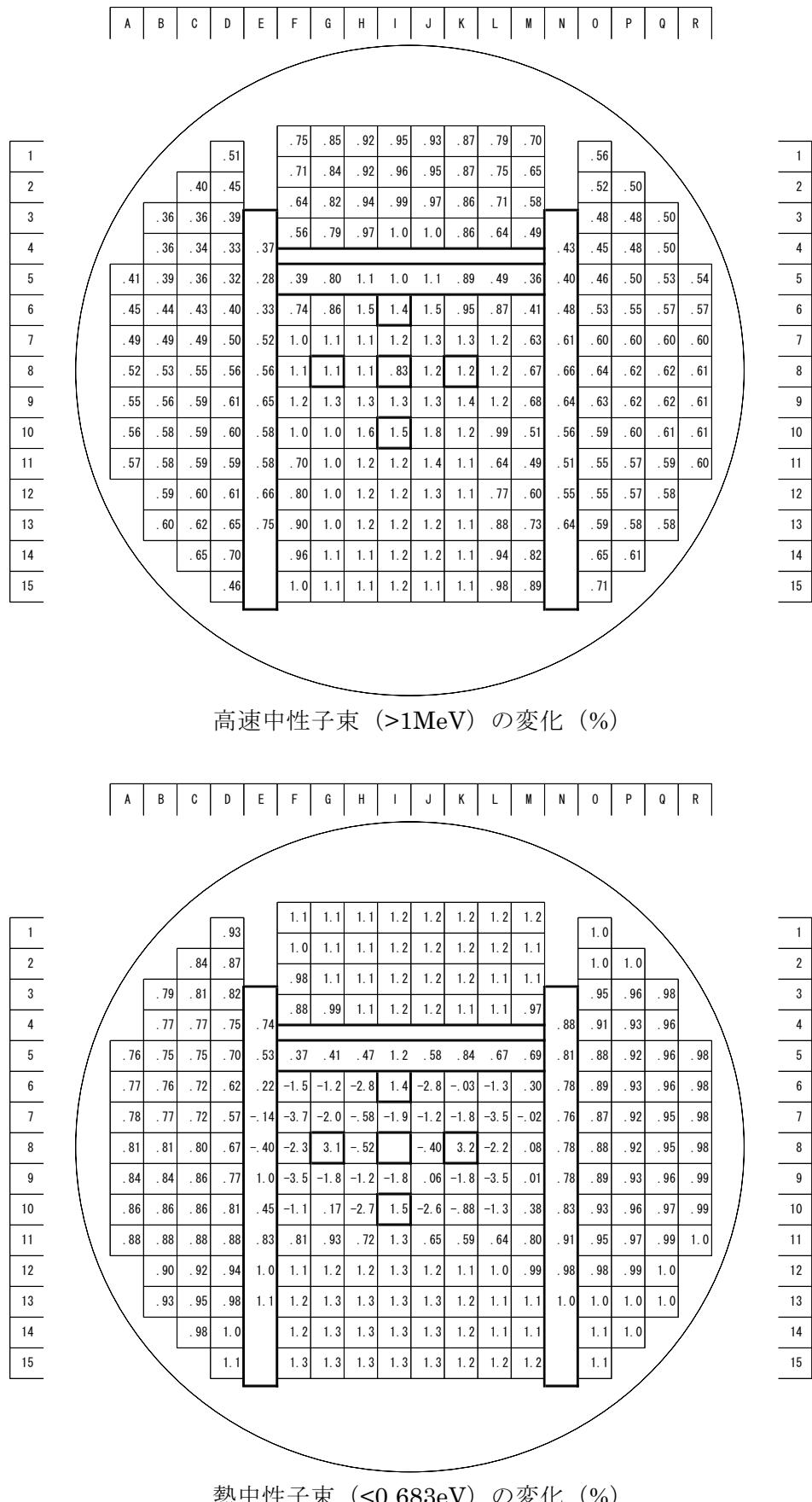
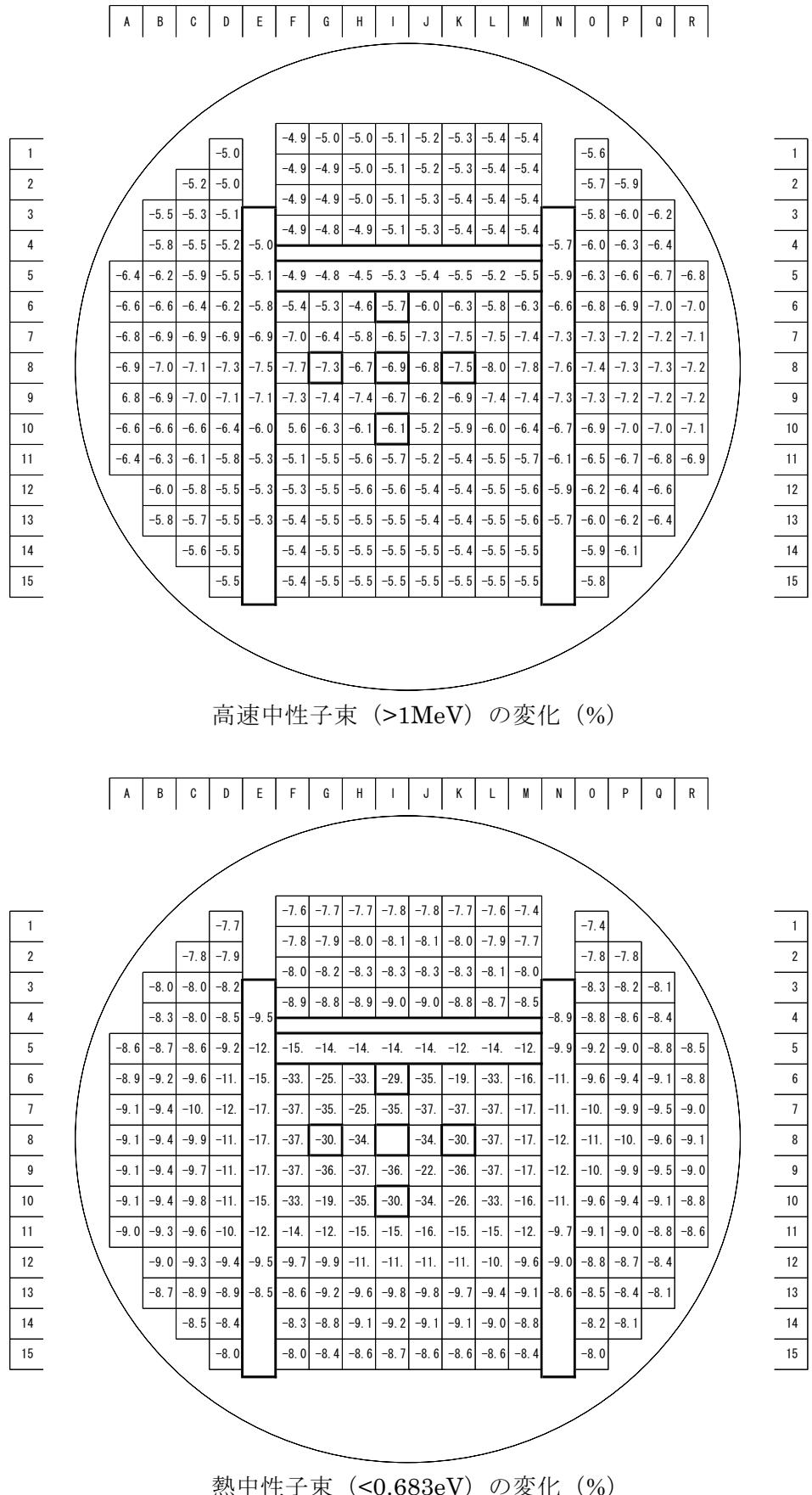


Fig.IV-3 U-Mo 燃料[3]の燃料板の燃焼日数に対する無限像倍率  $k\text{-}inf$  の変化

Fig.IV-4 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料炉心に対するU-Mo燃料[1]炉心における中性子束の変化

Fig.IV-5 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料炉心に対するU-Mo燃料[2]炉心における中性子束の変化

Fig.IV-6 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料炉心に対するU-Mo燃料[3]炉心における中性子束の変化

## 付録V JRR-3において照射試験を実施する場合の照射計画の検討

### 1. 照射キャプセルの設計

照射キャプセルは、JMTRにおけるU<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料ミニプレート照射時のキャプセルを参考にして、Fig.V-1に示すような形状とする。1本の照射キャプセルに4枚のミニプレート（寸法：20<sup>W</sup>×60<sup>L</sup>×1.27<sup>t</sup>mm）を装荷し、炉心に2本の照射キャプセルを装荷する。照射位置はJRR-3照射スケジュールから見て長期間の照射が可能なベリリウム照射孔とする（Fig.V-2参照）。また、ミニプレートの軸方向位置は、熱中性子束が最大となる炉心中心高さ付近とする。

アルゴンヌ国立研究所と仏国原子力庁とで共同開発しているU-Mo燃料の熱水力計算コードPLATEを用いて、JRR-3燃料炉心の運転条件におけるミニプレートの挙動を評価した結果、燃料芯材最高温度及び燃料板表面最高温度は、それぞれ約93°C及び約77°Cとなった。燃料芯材と表面温度との温度差が小さく、また、U-Mo燃料の被覆材は今まで使用実績のあるアルミニウム合金であることから燃料板に発生する熱応力は小さく、照射中のミニプレートの健全性は確保できると考えられる。なお、キャプセルの詳細設計はキャプセル内の冷却材流速の評価などを行なながら決定することとする。

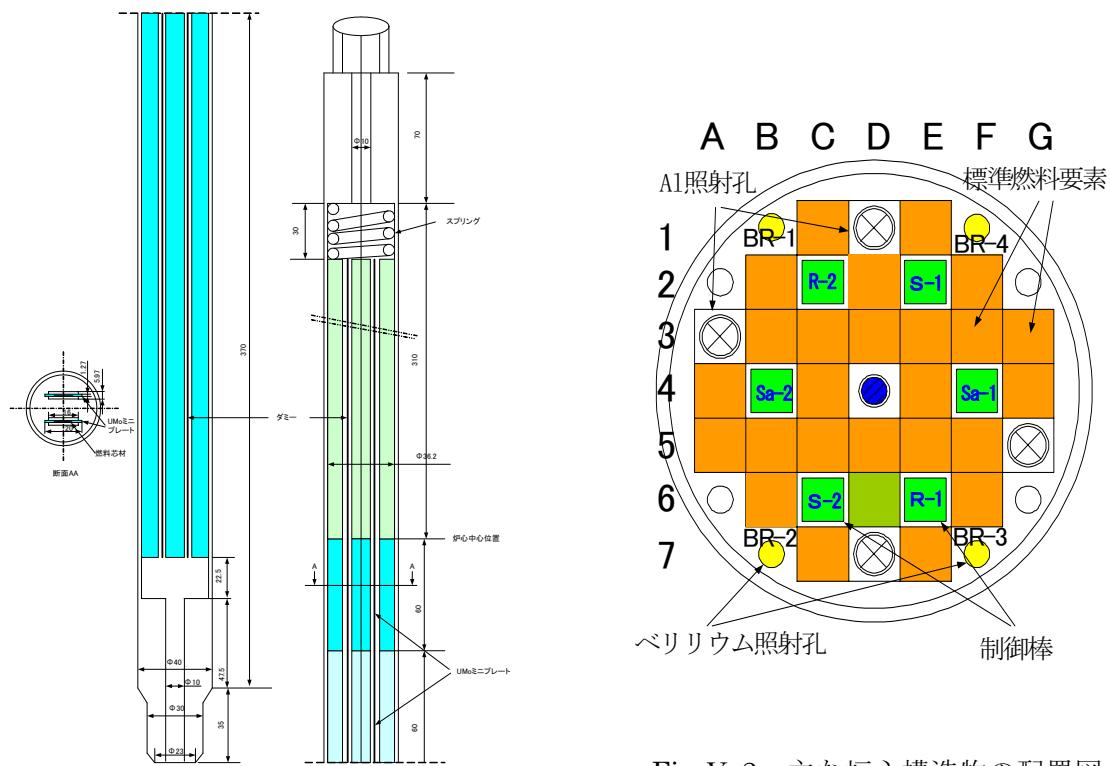


Fig. V-2 主な炉心構造物の配置図

Fig. V-1 U-Mo燃料用照射キャプセル

### 2. 照射期間の検討

ミニプレートの最高燃焼度は、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>燃料の最高燃焼度60%を包絡する値として、約70%とする。また、中間段階で取り出す試料の燃焼度は約40%とする。運転サイクル（20MW、25日間連続運転）毎のミニプレートの燃焼度はORIGEN-JRコードを用いて評価した。ここで熱

中性子束は  $1.3 \times 10^{14} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$  とした。Table V-1 に示すように、燃焼度が 70%に達するのは 8 サイクル照射後であり、これは約 1 年間の照射に相当する。また、中間段階（燃焼度約 40%）の試料は 3 サイクル終了後に取り出すこととする。

照射キャップセル（U-Mo 燃料）をキャスクに収納しホット試験室まで輸送するためには、キャスクの取り扱える制限量まで試料を冷却しなければならない。キャスクが取り扱える量は  $^{60}\text{Co}$  相当量で  $3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$  以下である。8 サイクル照射直後の試料（8 個）の総放射能量は約  $4.4 \times 10^{13} \text{Bq}$  であり、判断基準に照らし合わせても 1 衍低いことから照射直後でも輸送は可能である。

Table V-1 U-Mo ミニプレートの燃焼計算

| 照射サイクル | 燃焼度 (%) | 備 考      |
|--------|---------|----------|
| 1      | 14.2    |          |
| 2      | 26.3    |          |
| 3      | 36.8    | 中間段階取り出し |
| 4      | 45.7    |          |
| 5      | 53.4    |          |
| 6      | 60.4    |          |
| 7      | 65.7    |          |
| 8      | 70.6    | 最終取り出し   |

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量   | SI 基本単位 |     |
|-------|---------|-----|
|       | 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 |
| 光度    | カンデラ    | cd  |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量                     | SI 基本単位      |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度、質量密度                 | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 質量濃度 <sup>(a)</sup> 、濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の) 1      | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床医学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量                        | SI 組立単位               |                   |                      |   |
|----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---|
|                            | 名称                    | 記号                | 他のSI単位による表し方         | SI基本単位による表し方  |
| 平面角                        | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m   |
| 立体角                        | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                |
| 周波数                        | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                | 1                    | 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>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>2</sup>                             |
| エネルギー、仕事、熱量                | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup>                              |
| 仕事率、工率、放射束                 | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                             |
| 電荷、電気量                     | クーロン                  | C                 |                      | s A   |
| 電位差(電圧)、起電力                | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                       | ファラード                 | F                 | C/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                       | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                    | シーメンス                 | S                 | A/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束密度                       | テスラ                   | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                       | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-1</sup> A <sup>-1</sup>                            |
| インダクタンス                    | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス温度                    | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K   |
| 光束度                        | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd  |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>   | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                | lm/m <sup>2</sup>    | lm <sup>2</sup> cd  |
| 吸収線量、比エネルギー分与、カーマ          | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 酸素活性                       | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol   |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際に、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名前と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量            | SI 組立単位           |                       |   |  |
|----------------|-------------------|-----------------------|---|--|
|                | 名称                | 記号                    | SI 基本単位による表し方   |  |
| 粘度             | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>  |  |
| 力のモーメント        | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup>  |  |
| 表面張力           | ニュートン每メートル        | N/m                   | kg s <sup>2</sup>   |  |
| 角速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                  |  |
| 角加速度           | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                  |  |
| 熱流密度、放射照度      | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>  |  |
| 熱容量、エンタルピー     | ジュール每ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |  |
| 比熱容量、比エンタルピー   | ジュール每キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                      |  |
| 比エネルギー         | ジュール每キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>  |  |
| 熱伝導率           | ワット每メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>3</sup> K <sup>-1</sup>   |  |
| 体積エネルギー        | ジュール每立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>2</sup>   |  |
| 電界の強さ          | ボルト每メートル          | V/m                   | m kg s <sup>3</sup> A <sup>-1</sup>   |  |
| 電荷密度           | クーロン每立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> sA  |  |
| 表面電荷密度         | クーロン每平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA  |  |
| 電束密度、電気変位      | クーロン每平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA  |  |
| 誘電率            | ファラード每メートル        | F/m                   | m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                      |  |
| 透磁率            | ヘンリー每メートル         | H/m                   | m kg s <sup>2</sup> A <sup>2</sup>  |  |
| モルエネルギー        | ジュール每モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |  |
| モルエンタルピー、モル熱容量 | ジュール每モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |  |
| 照射線量(X線及びγ線)   | クーロン每キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> sA   |  |
| 吸収線量(β線及びγ線)   | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>-3</sup> s <sup>-2</sup>   |  |
| 放射強度           | ワット每ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |  |
| 放射輝度           | ワット每平方メートル每ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |  |
| 酵素活性濃度         | カタール每立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol   |  |

表5. SI接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>-12</sup> | ビコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼット  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨクト  | y  |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称    | 記号   | SI 単位による値   |
|-------|------|---|
| 分     | min  | 1 min=60s   |
| 時     | h    | 1h=60 min=3600 s  |
| 日     | d    | 1 d=24 h=86 400 s   |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad  |
| 分     | '    | 1'= (1/60)°=(π/10800) rad   |
| 秒     | "    | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad   |
| ヘクタール | ha   | 1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                  |
| リットル  | L, l | 1L=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1t=10 <sup>3</sup> kg   |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称       | 記号 | SI 単位で表される数値                               |
|----------|----|--|
| 電子ボルト    | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値  |
|-----------|------|---|
| バル        | bar  | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa  |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa   |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m   |
| 海里        | M    | 1 M=1852m   |
| バン        | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s   |
| ネバ        | Np   | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。  |
| ベル        | B    | 1 B=10 <sup>8</sup> Wb  |
| デジベル      | dB   | 1 dB=10 <sup>1</sup> Pa   |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値  |
|-----------|------|---|
| キュリ       | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                |
| レントゲン     | R    | 1 R=2.58×10 <sup>4</sup> C/kg                               |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                              |
| レム        | rem  | 1 rem=1cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                              |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                 |
| フェルミ      | fm   | 1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                              |
| メートル系カラット | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa                                   |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm = 101 325 Pa  |
| カロリ       | cal  | 1cal=4.1868J (115°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー) 4.184J (熱化学カロリー) |
| ミクロ       | μ    | 1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m                                  |

