

クリーンバーン高温ガス炉の研究開発
—システム概念と今後の展望—
シリーズ発表資料集

日本原子力学会 2013 年秋の大会

Proceedings of the Series Presentations
on Research and Development of Clean Burn HTGR
- System Concept and Future Prospects -
2013 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan

(編) 深谷 裕司

(Ed.) Yuji FUKAYA

原子力水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ユニット

Small-sized HTGR Research & Development Division
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

May 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

クリーンバーン高温ガス炉の研究開発
—システム概念と今後の展望—
シリーズ発表資料集

日本原子力学会 2013 年秋の大会

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ユニット

(編) 深谷 裕司

(2014 年 1 月 20 日 受理)

2013 年 9 月 3 日(火)～5 日(木)に開催された日本原子力学会 2013 年秋の大会においてクリーンバーン高温ガス炉のシリーズ発表が行われた。クリーンバーン高温ガス炉システムは、プルサーマルによるプルトニウム燃焼よりも安全で高い核拡散抵抗性および高い燃焼効率を持つ高温ガス炉を用いたプルトニウム専焼システムであり、本シリーズ発表は、その概念の提示及び今後の研究開発の展望を示すものであった。

本報告書は本シリーズ発表の概要及び使用された発表資料を収録したものである。本報告書により本研究の現時点での検討状況、課題等が確認できた。

**Proceedings of the Series Presentations on
Research and Development of Clean Burn HTGR
- System Concept and Future Prospects-**

2013 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan

(Ed.) Yuji FUKAYA

Small-sized HTGR Research & Development Division,
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 20, 2014)

The series presentations on Clean Burn HTGR were performed in the 2013 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan. The Clean Burn HTGR has been proposed and investigated as a plutonium burner system which has high proliferation resistance and high plutonium incineration efficiency by comparing with MOX-LWR. The presentations showed the system concept and future prospects of the Clean Burn HTGR.

This report includes materials of the presentations. By this report, the subject of the present study becomes obvious.

Keywords: Clean Burn, HTGR, Plutonium Burner

目 次

1. はじめに	1
2. 発表内容	3
2.1 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (1)全体概要	
後藤 実、深谷裕司、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、	
西原健司、辻本和文、千葉敏	4
2.2 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (2)核設計	
深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、	
千葉 敏	9
2.3 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (3)シナリオ検討	
西原健司、辻本和文、	
深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、	
千葉 敏	14
2.4 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (4)燃料製造に関する検討	
植田祥平、相原 純、水谷義隆、大橋弘史、坂場成昭、	
橘 幸男、國富一彦	24
3. おわりに	29
謝辞	32
参考文献	32

Contents

1. Preface	1
2. Presentations	3
2.1 Research and Development of Clean Burn High Temperature Gas-cooled Reactor	
(1) Overview	
Minoru GOTO, Yuji FUKAYA, Hirofumi OHASHI, Yukio TACHIBANA,	
Kazuhiko KUNITOMI, Kenji NISHIHARA, Kazufumi TSUJIMOTO,	
Satoshi CHIBA	4
2.2 Research and Development of Clean Burn High Temperature Gas-cooled Reactor	
(2) Nuclear Design	
Yuji FUKAYA, Minoru GOTO, Hirofumi OHASHI, Yukio TACHIBANA,	
Kazuhiko KUNITOMI, Satoshi CHIBA	9
2.3 Research and Development of Clean Burn High Temperature Gas-cooled Reactor	
(3) Case Study	
Kenji NISHIHARA, Kazufumi TUJIMOTO, Yuji FUKAYA, Minoru GOTO,	
Hirofumi OHASHI, Yukio TACHIBANA, Kazuhiko KUNITOMI,	
Satoshi CHIBA	14
2.4 Research and Development of Clean Burn High Temperature Gas-cooled Reactor	
(4) Study on Fuel Fabrication	
Shouhei UETA, Jun AIHARA, Yoshitaka MIZUTANI, Hirofumi OHASHI,	
Nariaki SAKABA, Yukio TACHIBANA, Kazuhiko KUNITOMI	24
3. Conclusion	29
Acknowledgements	32
References	32

1. はじめに

我が国の原子力に関する研究開発は、高速増殖炉を中核とした核燃料サイクルの確立を目指し行われてきた経緯があり、その旨を受けた原子力立国計画¹⁾が2006年6月に策定されている。しかし、2011年3月に発生した東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所事故を契機に原子力に対し多様な議論がなされるようになった。特に、橋川武郎氏が示した「リアルでポジティブな原発のたたみ方」²⁾「エネルギーベストミックス」³⁾と呼ばれる意見は大きな反響を呼んだ。エネルギーベストミックスとはエネルギーミックスとも呼ばれ、一つのエネルギー源によらず複数のエネルギー源の最適な組み合わせる考え方を指す。この中で橋川氏は発電電力に対する原子力の占める割合を変えた複数のケースを挙げ、それぞれのケースが採用された場合の未来を予測し議論している。2011年10月の閣議決定を元に内閣府においてエネルギー・環境会議⁴⁾が開催された。2012年6月には、橋川氏と同様に2030年における原子力発電の占めるパーセンテージに基づく、ゼロシナリオ、15シナリオ、20～25シナリオの3つのシナリオが提示され⁵⁾、国民の意見を反映させるため、意見聴取会の他、議論とアンケートを組み合わせた討論的世論調査が実施された。その結果を受け、2012年9月にはゼロシナリオをベースとした、革新的エネルギー・環境戦略⁶⁾が閣議決定されている。

一方で、原子力委員会は新たな原子力政策大綱の策定を目指し、2010年11月に新大綱策定会議⁷⁾を設置し審議を開始した。東京電力福島第一原子力発電所事故を受け一度は中断されたが、後に再開されている。上記に示したような東京電力福島第一原子力発電所事故を受けてのエネルギーミックスの選択肢に関する議論もなされているが、原子力発電自体が廃止されても余剰Puの問題は解決されなければならないと、Pu専焼炉が必要であるとの趣旨の議論⁸⁾がなされている。新大綱策定会議は脱原発を目標とした革新的エネルギー・環境戦略の決定を受け2012年の10月に廃止となった。

また、この余剰Puの問題は原子力継続を考える上でも重要である。原子力稼働時における重要な問題として、使用済燃料の貯蔵がある。現在、原発の使用済燃料プールの使用可能年数は、全原発を平均しても8年程度と言われている。中間貯蔵施設が建設されているが、その設備容量は十分ではなく、再処理施設が稼働しない限り運転中止に追い込まれる原子炉が出てくるのが危惧されている⁹⁾。現在、日本は海外の再処理委託等により44tのPuを保有している¹⁰⁾が、再処理施設が稼働した場合は年間8tのPuが分離・回収されることになり、余剰Puの問題は深刻なものとなる。年間8tのPuを消費するためには、プルサーマルの1/3部分MOX炉心で13基程度必要となるが、現時点で試験的ではあるが商用稼働したプルサーマル炉は4基程度ある。しかも、東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、更なる現行軽水炉よりも安全性が危惧されるプルサーマル炉の増加は難しいと推測される。したがって、現行軽水炉とは異なる原理によりPuをより安全かつ効率的に燃焼させる新型炉の導入が必要である。

このような状況を受け、原子力水素・熱利用研究センターでは、余剰Puを、高い安全性を有する高温ガス炉で燃焼するクリーンバーン高温ガス炉概念を提案し研究開発を開始した。高温ガス炉は冷却材喪失時においても燃料溶融に至らない高い安全性を有しており、東京電力福島第一原子力発電所事故の様な状況にあっても燃料溶融には至らない。本報告書は、このクリ

クリーンバーン高温ガス炉の概念及び研究開発に関し、2013年9月3日(火)～5日(木)に開催された日本原子力学会 2013年秋の大会¹¹⁾において発表されたシリーズ発表に関する発表資料を収録したものである。なお、発表資料には「クリーン燃焼高温ガス炉」との名称が用いられているが、後に「クリーンバーン高温ガス炉」への名称の変更が行われている。発表資料以外では、「クリーンバーン高温ガス炉」を用いる。この「クリーン」という言葉には核分裂性プルトニウムを効率的に燃焼することが出来るとする意味を持たせている。本報告書はシリーズ発表をまとめることにより、現状におけるクリーンバーン高温ガス炉の検討状況及び課題の把握を目的としている。

2.発表内容

発表内容はクリーンバーン高温ガス炉の研究開発について、(1)全体概要¹²⁾、(2)核設計¹³⁾、(3)シナリオ検討¹⁴⁾、(4)燃料製造に関する検討¹⁵⁾の4部構成となっている。著者はそれぞれ、

(1)全体概要

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

後藤 実、深谷裕司、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

西原健司、辻本和文

東京工業大学

千葉 敏 教授

(2)核設計

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦

東京工業大学

千葉 敏 教授

(3)シナリオ検討

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

西原健司、辻本和文

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦

東京工業大学

千葉 敏 教授

(4)燃料製造に関する検討

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

植田祥平、相原 純、大橋弘史、坂場成昭、橘 幸男、國富一彦

原子燃料工業株式会社

水谷義隆

となっている。原子力基礎工学研究部門が含まれるのは、クリーンバーン高温ガス炉と ADS の連携シナリオを検討したためである。東京工業大学の千葉敏教授には、クリーンバーン高温ガス炉の概念及び核設計に関し全般的にご指導をいただいている。なお、千葉教授には、別途、同大会の企画セッションとして総合講演・報告 5「高温ガス炉の課題と解決法（安全性、経済性、持続可能性）」(3)高温ガス炉の持続可能性-クリーン燃焼高温ガス炉と ADS による TRU 変換システムを用いたバックエンド問題の解決¹⁶⁾と題した発表をしていただいている。この発表の中では、クリーンバーン高温ガス炉と ADS の併用による効率的な燃焼・核変換を独立したバックエンドオプションとみなし、既存の軽水炉を含む多くの原子力システムと共存できる有効なオプションであるとの主張をしている。内容が重複しているため、本報告書における転載は割愛する。以下にシリーズ発表の発表資料を示す。

2.1 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (1)全体概要

後藤 実、深谷裕司、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、西原健司、辻本和文、千葉 敏

クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発

(1) 全体概要

日本原子力学会 2013年秋の大会
2013年9月4日
八戸工業大学

日本原子力研究開発機構
○後藤実, 深谷裕司, 大橋弘史, 橘幸男, 國富一彦, 西原健司, 辻本和文

東京工業大学
千葉敏

日本原子力学会2013年秋の大会 2013年9月4日 八戸工業大学 G35

1

発表内容

- 研究の背景
- クリーン燃焼高温ガス炉(CBHTR)の概要
- CBHTRの特長
- 研究の概要
- まとめ

研究の背景

■ 我が国のPu保有量

- 44 tonを保有(国内9 ton、海外35 ton)
- 六カ所再処理施設稼働後は、8 ton/yearで増加

■ 余剰Puを持たないという国際公約

“Japan has promoted the development and utilization of nuclear energy, which is strictly limited to peaceful purposes, in accordance with the Atomic Energy Basic Law. The nuclear fuel cycle is promoted based on the principle that plutonium beyond the amount required to implement the program is not to be held, i.e. the principle of no surplus plutonium.”[1]

国際公約を遵守するためには、軽水炉MOXによる燃焼や高速増殖炉の開発が順調に進まない場合に備えたバックアップオプションが必要不可欠



Puを安全に燃焼でき発電も可能な**クリーン燃焼高温ガス炉(CBHTR、熱出力600MWt)**の概念検討を実施

[1] IAEA, “Communication Received from Certain Member States Concerning their Policies Regarding the Management of Plutonium”, INFCIRC/549/Add.1, 31 March 1998.

CBHTRシステムの概要 – 燃料の流れ

- ① 軽水炉使用済み燃料からPuを回収し、化学的に不活性なYSZ(Yttria-Stabilized Zirconia)を母材とする**PuO₂-YSZ被覆燃料粒子**(図1)を製造
- ② PuO₂-YSZ被覆燃料粒子を**CBHTR**に装荷し、燃焼により核分裂性Puを削減
- ③ CBHTRの使用済み燃料は、
 - (1) SiC被覆層の優れた健全性などを活かした**直接地層処分**
 - (2) UO₂を燃料とする高温ガス炉(UHTR)による**核変換処理**
 - (3) 加速器駆動炉(ADS)による**核変換処理**

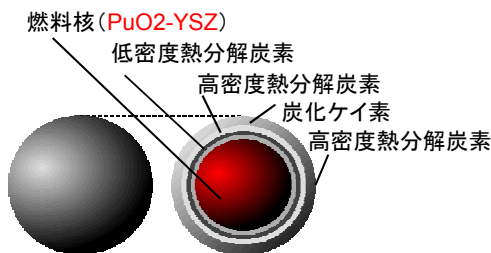


図1 PuO₂-YSZ被覆燃料粒子

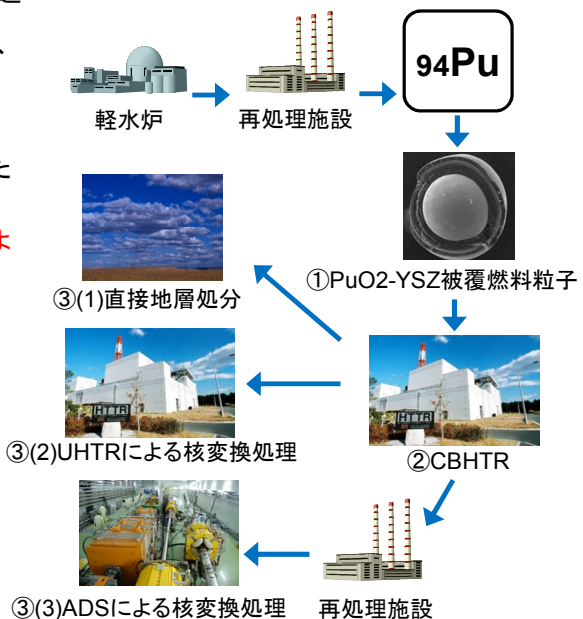


図2 CBHTRの燃料の流れ

CBHTRシステムの概要 – 再処理およびPu燃料製造

■ 現状のシステム

- 核拡散抵抗性の観点からPuの単離回収は認められておらず(日米再処理交渉)、PuはUと混ざって回収し、PuO₂-UO₂燃料(MOX燃料)に加工
- MOX燃料は、燃焼時にU-238からPuが生成されるため、燃焼により核分裂性Puを効率よく削減することは困難

■ 提案するシステム

- 核拡散抵抗性を確保し、かつ、核分裂性Puを効率よく削減するために、PuはYSZと混ざって回収し、PuO₂-YSZ被覆燃料粒子に加工

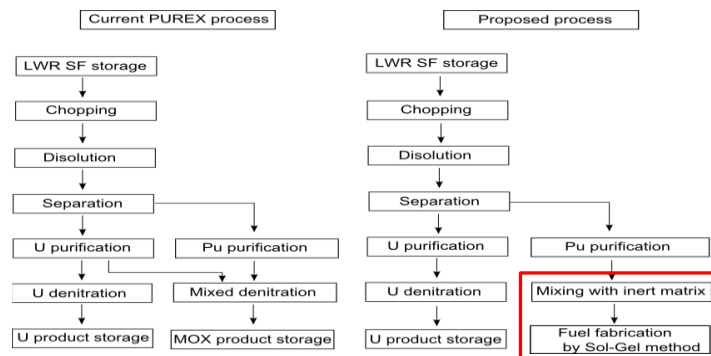


図3 再処理および燃料製造の流れ

CBHTRシステムの特長

■ 原子炉の優れた安全性

- 冷却材を喪失し、制御棒が炉心に挿入されなくても自然に安定な状態に保たれる(図4)。
- 炉心構造材である高密度黒鉛は、空気侵入時でも燃えない(火災は発生しない)。
- 炉心に水および金属が無いので、水素が発生しない(水素爆発は起こらない)。

特長1：燃焼による安全なPuの削減が可能

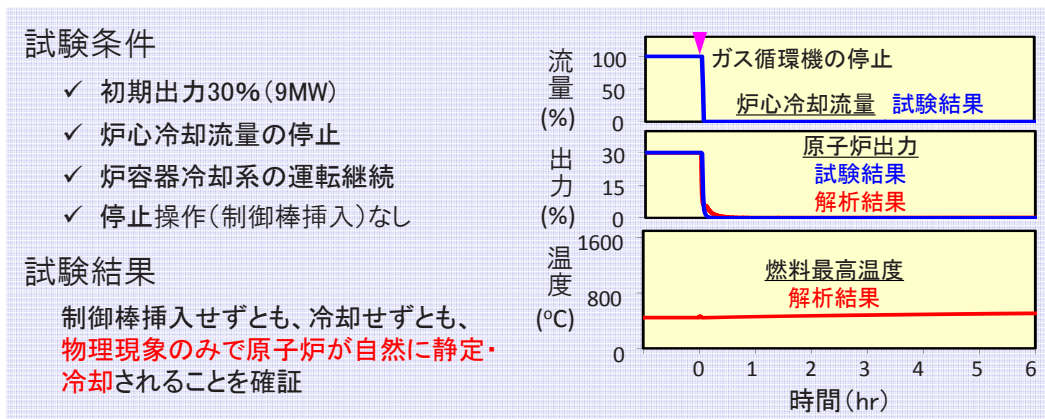


図4 HTTRで実施した冷却材流量停止試験

CBHTRシステムの特長

■ 燃料母材の高い化学的安定性

- ▶ 燃料母材であるYSZは難溶性(硝酸に溶けない)であり、Puの回収は困難



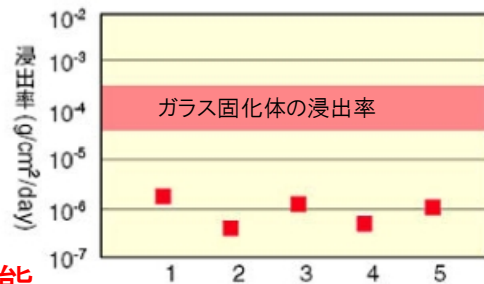
特長2：高い核拡散抵抗性

■ 燃料被覆層の優れた健全性と母材の低いFP浸出率

- ▶ SiC被覆層の健全性は100万年オーダー[2]
- ▶ 燃料母材であるYSZのFP浸出率はガラス固化体の1/100程度(図5)



特長3：安全・安定な地層処分が可能



不活性母材燃料のタイプ(5がYSZ燃料)

図5 不活性母材燃料およびガラス固化体のCs浸出率[3]

[2] C. Rodriguez, et. al, "Deep-Burn: making nuclear waste transmutation particle", NED 222 (2003).

[3] 原子力機構HP, <http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/tayu/ACT04J/Frame0104.htm>.

研究の概要

CBHTRシステムを成立させるために必要な以下の項目について検討を実施

■ 軽水炉などより高いPu燃焼効率の実現

- ▶ 燃料配置およびシャッフリング方法などの検討

■ 導入シナリオの策定

- ▶ CBHTRとADSの連携シナリオの検討

■ PuO₂-YSZ被覆燃料粒子の製造方法の確立

- ▶ PdによるSiC層腐食破損やFP希ガス等による内圧破損を防ぐことが可能な燃料の設計に関する検討
- ▶ 燃料核製造工程、および被覆工程の検討

まとめ

余剰Puの削減を目的とし、Puを安全に燃焼でき発電も可能な熱出力600MWtのクリーン燃焼高温ガス炉(CBHTR)の概念検討を実施した。

■ CBHTRシステムの概要

- ▶ 軽水炉使用済み燃料から回収したPuをPuO₂-YSZ被覆燃料に加工し、高温ガス炉で燃焼して削減
- ▶ Pu燃料はワンスルーで取り出して直接地層処分、UHTRで核変換処理、または、ADSで核変換処理

■ CBHTRシステムの特長

- ▶ 高温ガス炉によるPuの安全な燃焼による削減が可能
- ▶ 燃料の高い化学的安定性による高い核拡散抵抗性
- ▶ 燃料の優れた健全性による安全・安定な地層処分が可能

■ 研究の概要

- ▶ 燃料配置およびシャッフリング方法などの検討 ((2) 核設計)
- ▶ CBHTRとADSの連携シナリオの検討 ((3) シナリオ検討)
- ▶ 燃料設計、燃料核製造、および被覆工程の検討 ((4) 燃料製造に関する検討)

2.2 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (2)核設計

深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、千葉 敏

日本原子力学会
2003年秋の大会
G36

クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (2)核設計

2013.9.4

○深谷裕司¹, 後藤 実¹, 大橋弘史¹, 橘 幸男¹,
國富一彦¹, 千葉 敏²

¹原子力機構 原子力水素・熱利用研究センター
²東京工業大学

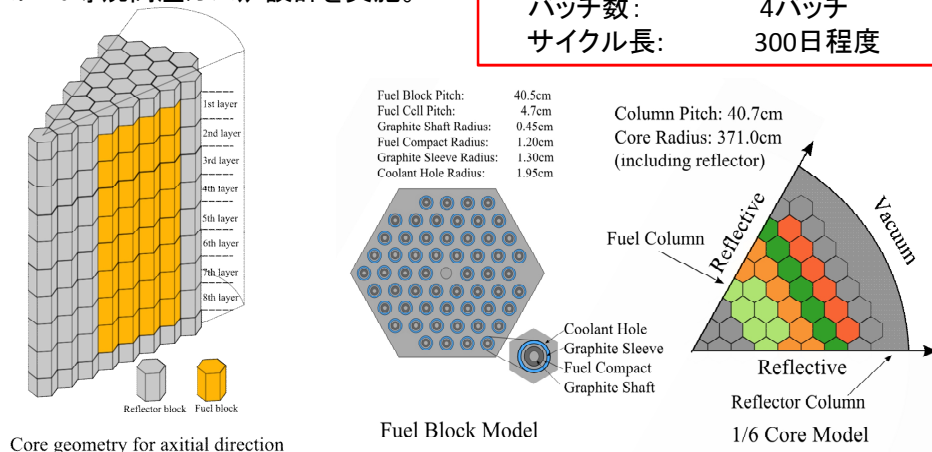
1

クリーン燃焼高温ガス炉の概要

右に示した主な設計諸元を目標に
JAEAで研究開発を進めてきた
高温ガス炉商用炉GTHTR300ベースの設計
をベースにPu専焼高温ガス炉設計を実施。

主な設計諸元

熱出力:	600MW
重金属装荷量:	1.2t
バッチ数:	4バッチ
サイクル長:	300日程度



クリーン燃焼高温ガス炉の炉心構成

YSZ添加による核特性への影響等を考慮し設計点を確認する必要がある。

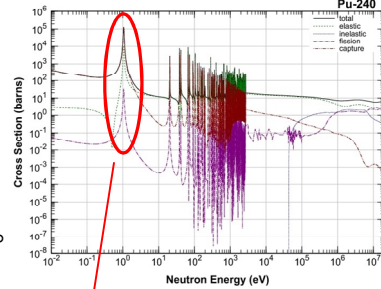
2

設計コードについて

SRACコード:

- ・軽水炉設計のために開発されたコードシステム。
- ・Pu燃料高転換型軽水炉解析のために、超詳細群中性子減速計算モジュールが実装された。(スペクトルの硬い炉型に対しての議論に特化していた恐れがある。)
- ・高温ガス炉用に二重非均質解法が整備され、カザフを想定した高温ガス炉HTR50Sの設計実績がある。

Pu-240



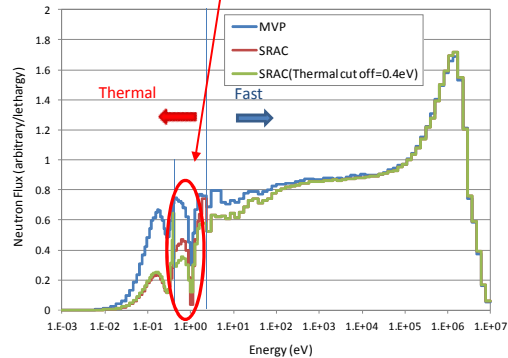
MVPコード:

- ・モンテカルロ法の中性子輸送計算コード
- ・HTTR臨界予測等で活躍。
- ・その後、二重非均質性を直接的に扱える確率的幾何形状が実装された。

代表的なクリーン燃焼高温ガス炉単ピンセルモデルで増倍率が5% Δk/k'程度も異なる。

SRACコードの問題点:

- ・サーマルカットオフエネルギー以下では、**超詳細群中性子減速計算及び二重非均質問題**の取り扱いが出来ない。

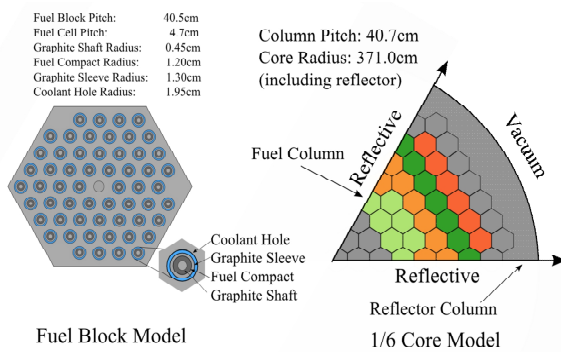


スペクトルの比較

当面はMVPにより炉心設計を行い、SRACコードについては改良を検討。

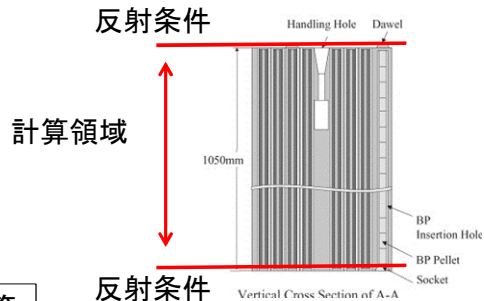
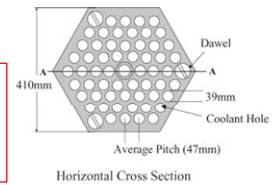
パラメーターサーベイのための2次元簡易計算

- ・1/6炉心に対し、上下方向に反射条件を用いた2次元体系とする。(炉心長は8mもあるため、中性子の軸方向の漏えいの影響は0.5% Δk/k'程度と小さい)
- ・1バッチ炉心として達成燃焼度をバッチ外挿する。



径方向は1/6炉心

軸方向は燃料ブロック1体分を計算



実質的な2次元モデルにより1バッチ炉心計算

バッチ外挿:

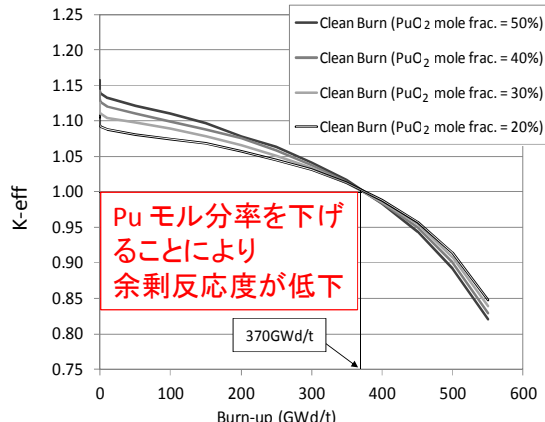
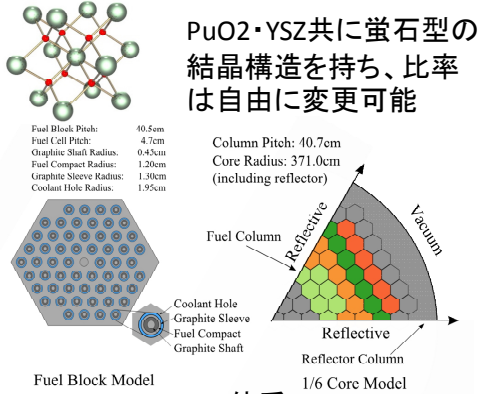
$$B_n = 2n / (n+1) B_1$$



4バッチ想定では燃焼度は1.6倍

YSZ混合割合の決定(2次元モデル)

PuO₂-YSZ燃料はそのモル分率を自由に変更でき、燃料インベントリを保存する形でモル分率を変え最適設計を決定。



燃料組成 (Puインベントリは保存)

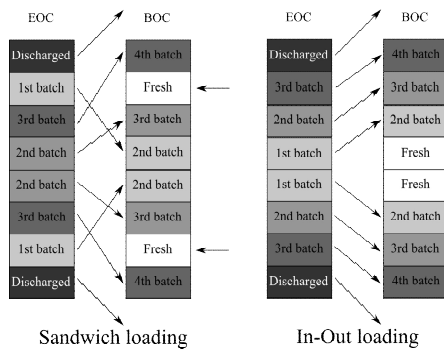
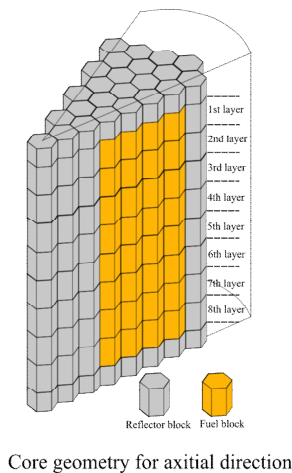
PuO ₂ mole fraction (%)	Composition	PuO ₂ density (g/cm ³)	Packing fraction (%)
20	64Zr-17Y-19Pu	2.46	46.5
30	56Zr-15Y-29Pu	3.63	31.6
40	48Zr-13Y-39Pu	4.77	24.0
50	40Zr-11Y-49Pu	5.87	19.5

被覆燃料粒子充填率30%程度が現実的

PuO₂モル分率の低下は二重非均質性の低下につながり、余剰反応度を低下させる。YSZの中性子捕獲の効果は無視でき、達成燃焼度(4バッチ・590GWd/t)は変わらない。PuO₂モル分率30%にすることにより余剰反応度の小さな炉心の設計実現可能。⁵

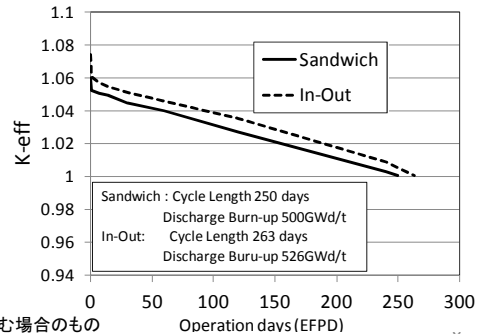
3次元モデルによる平衡炉心の設計

高温ガス炉燃料は軸方向に分割(8レイヤー)されており、軸方向にシャッフリングが可能。本研究でもGTHTTR300でも用いられている軸方向シャッフリングを考慮。



サンドイッチパターン:
GTHTTR300で提案、新燃料で古い燃料を挟むパターン。

In-Outパターン:
新燃料を中心に配置する中性子経済の高いパターン。



シャッフリングを考慮した3次元平衡炉心作成により炉心性能を確認。

※本解析結果はMAを含む場合のもの

クリーン燃焼高温ガス炉の燃焼特性

比較指標:

Pu239消費率: Pu241は半減期14.4年に対しPu239の半減期は2万4千年であり、Pu239の消費率が重要。

核分裂性核種消費率: 核分裂性核種全体が消費出来れば短期的にも魅力的である。

Npと親核種消費率: 4N+1崩壊系列の核種で地下水に溶けやすいTh229、Np237に変化。

燃焼特性

	CBHTR(MA無)	CBHTR(MA有)
取出し燃焼度(GWd/t)	700	500
Pu239消費率(%)	99.5	95
核分裂性核種消費率(%)	93.6	80
Npと親核種消費率(%)	54.2	40

MAを含まない燃焼では核分裂性物質のほぼ全量が燃焼可能。

MAを含む場合は、燃焼度が500GWd/t程度に低下し核分裂性物質の燃え残りが発生するが、環境負荷に顕著なNpとその親核種の4割程度が減少。

7

クリーン燃焼高温ガス炉設計のまとめ

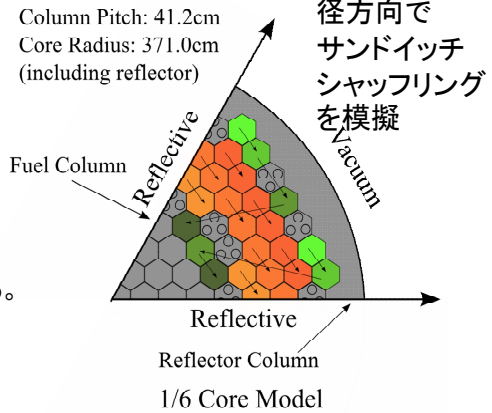
- ・2次元1バッチ炉心計算を元に、クリーン燃焼高温ガス炉の核特性を確認し、それを元に設計点(PuO₂モル分率30%)を決定した。
- ・YSZの中性子捕獲の影響は無視できる程度であり、核的にも不活性であることを確認した。
- ・YSZによるPuの希釈は、BPを用いなくても余剰反応度を低減でき、設計点としても好ましい。
- ・3次元解析により、シャッフリングを考慮した平衡炉心の設計を確認した。MAを含まない場合は700GWd/t程度を見込め核分裂性物質のほぼ全量を燃焼できることが期待される。一方で、MAを添加する場合は核分裂性物質が燃え残り、燃焼度が低下するが、Npとその親核種の4割程度が変換可能である。

8

更なる高燃焼度化の試み(MA含有燃料)

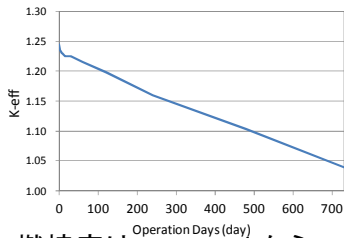
U燃料炉心によるクリーン燃焼高温ガス炉使用済燃料の再照射を行う燃料体数は
両炉型の平衡状態を想定して決定する。

項目	U炉心	クリーン燃焼高温ガス炉
導入基数	59	7
サイクル長(年)	2	0.8
バッチ数	2	4
燃料カラム数	90	144
再照射カラム数	約11	0

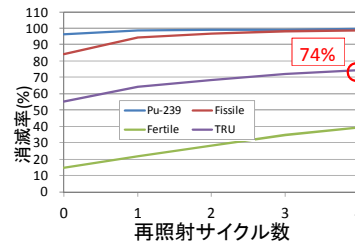


1/6炉心(U燃料15体)に1サイクル当たり2体受け入れる。
内周、外周に再照射体を4バッチ分装荷が可能。
再照射体は8年間の照射が可能。

再照射燃料に対する反応度補償のため
ウラン濃縮度は14wt%→20wt%へ変更



二次元モデルによる臨界性評価



燃焼度は500GWd/tから740GWd/tへ増加、核分裂性物質のほぼ全量、TRUの74%程度燃やせ、親核種についても4割程度燃焼している。

2.3 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (3)シナリオ検討

西原健司、辻本和文、深谷裕司、後藤 実、大橋弘史、橘 幸男、國富一彦、千葉 敏

クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (3) シナリオ検討

日本原子力研究開発機構

○西原健司 辻本和文 深谷裕司 後藤実

大橋弘史 橘幸男 國富一彦

東京工業大学

千葉 敏

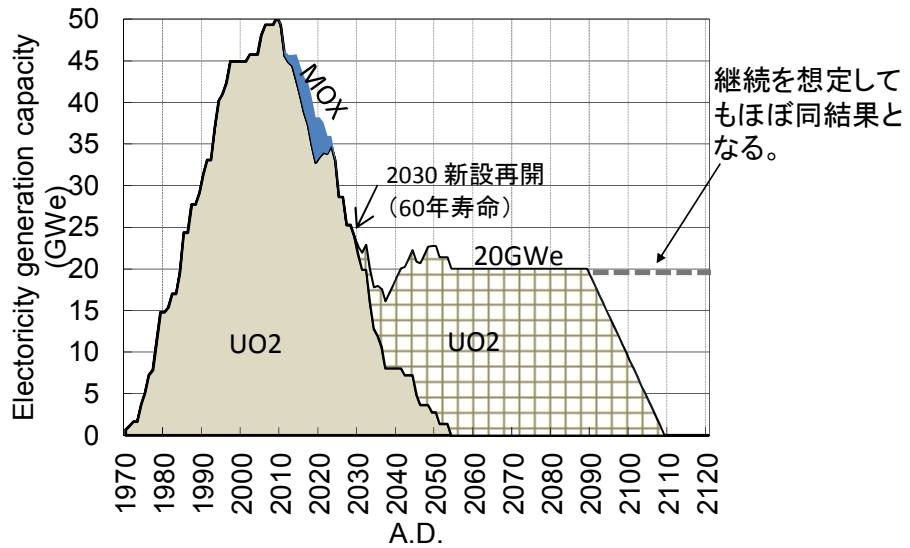
1

概要

- 原子力縮小継続シナリオを仮定
 - 2030年に原発新設を再開し、20GWeで60年間利用する。
 - 新設炉= 軽水炉 or **ウランガス炉(U-HTR)**
- ウラン使用済燃料中のPuをどうする…？
 - プルサーマル燃料を軽水炉で利用
 - **Clean Burn**
- ウラン使用済燃料中のMAをどうする…？
 - **ADS**
- 評価項目
 - Pu, MAインベントリ
 - 処分場規模
 - Puの核物質魅力度

2

原子力縮小継続シナリオ



3

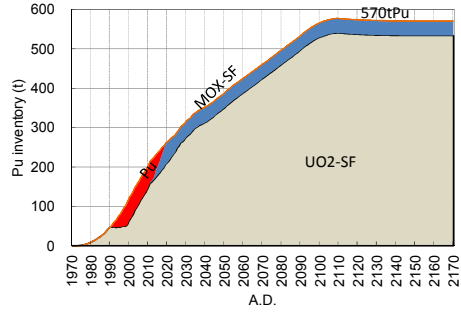
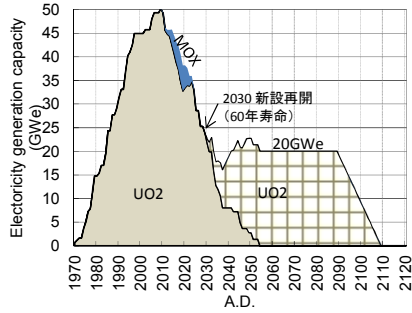
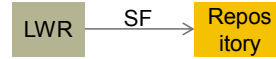
解析シナリオ

シナリオ	炉型 (2030 ~)	使用済燃料再処理後のPu受け入れ先 (下段)MA受け入れ先				
		UO2	MOX	U-HTR	CB-HTR	
U	LWR	×	-	-	-	再処理無し。直接処分。
M	LWR	→MOX	×	-	-	プルサーマル利用。
UH+CB	U-HTR	→CB	-	→CB	×	同上
UH+CB+ADS	U-HTR	→CB →ADS	-	→CB →ADS	→ADS →ADS	UH、CB、ADS利用
UH+ADS	U-HTR	→ADS →ADS	-	→ADS →ADS	-	UH、ADS利用

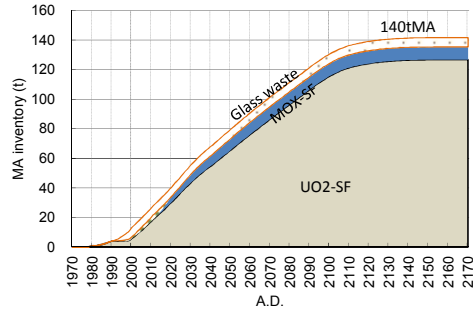
注)ハイフンは、発生しないことを意味する。ただし、全てのシナリオでMOXは少量発生している。
 「×」は、再処理せず、直接処分することを意味する。
 OT=once-through、M=MOX=PuThermal、
 UH=U-HTR、CB=CB-HTR、ADS=Accelerator-driven system

4

U

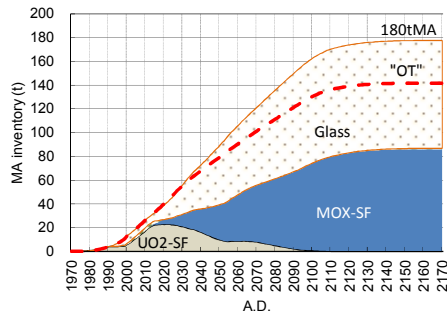
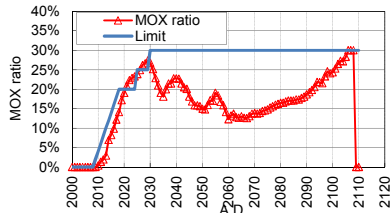
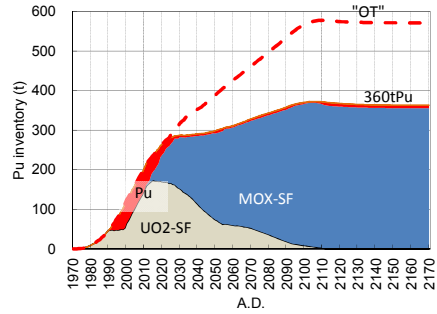
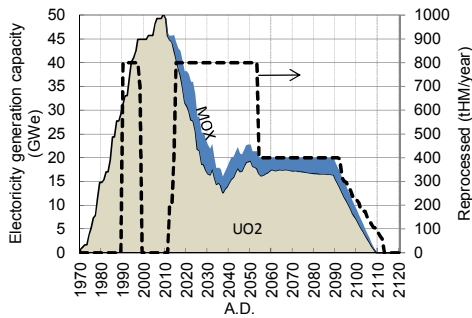
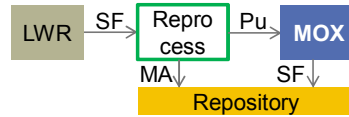


✓ ウラン燃料中のPu570トン、MA140トンが直接処分される。



5

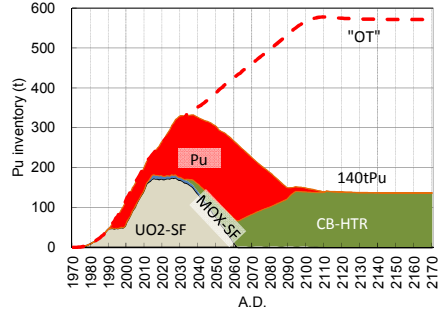
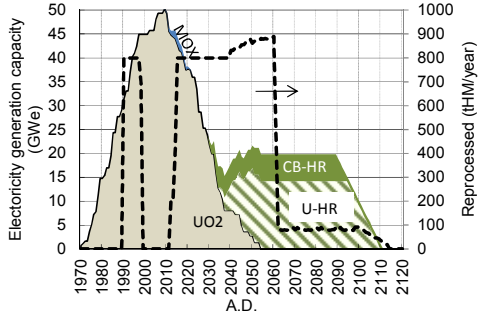
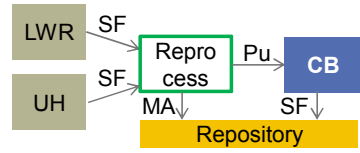
M



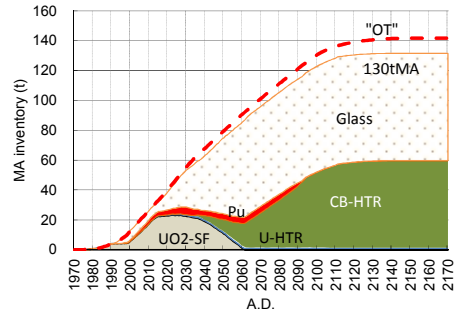
✓ プルサーマル20%付近で均衡する。
 ✓ プルサーマル燃料中のPu360トン、MA180トンが直接処分される。

6

UH+CB

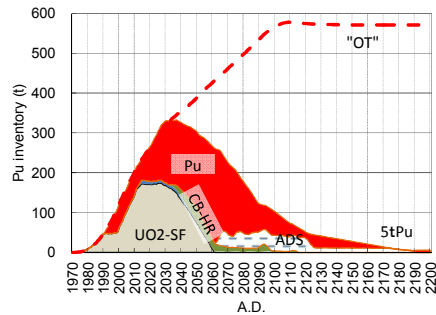
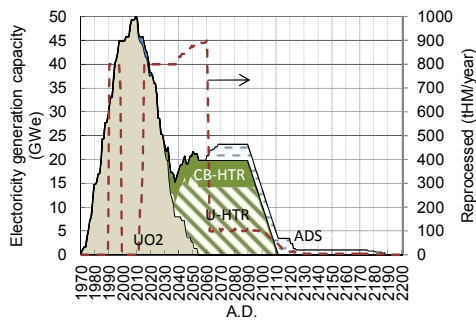
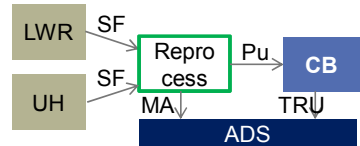


- ✓ U-HTR燃料は再処理される
- ✓ U-HTR47基、CB19基を導入する。
- ✓ プルサーマル燃料中のPu140トン、MA130トンが直接処分される。
- ✓ UO2-MOX系から、ガス炉系に移行することで、Pu量が半減。

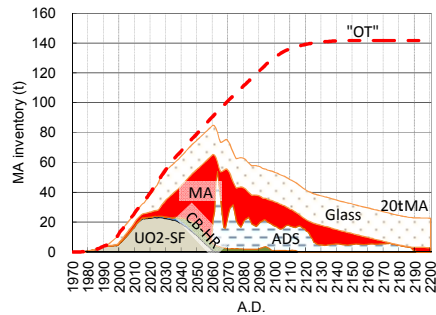


7

UH+CB+ADS

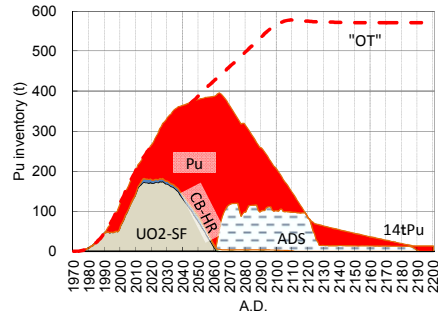
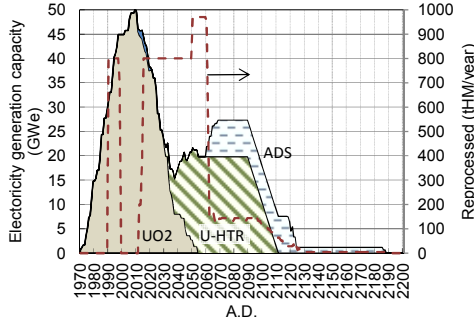
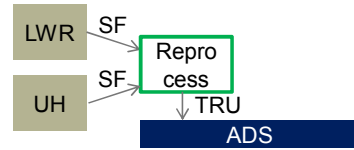


- ✓ U-HTR47基、CB19基、ADS17基
- ✓ ADSは、2060~2180年(2世代)に渡って運転する。
- ✓ Puは5tにまで減少
- ✓ 20tMAは海外委託・初期六カ所再処理工場 (~2025)でガラス固化されており回収不能
- ✓ 実行可能な極限までTRUを核変換可能

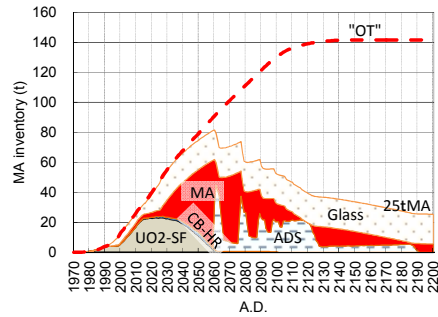


8

UH+ADS

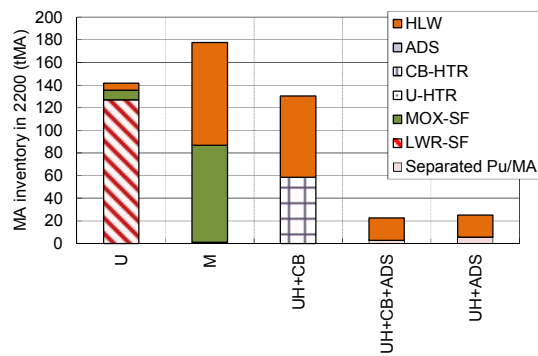
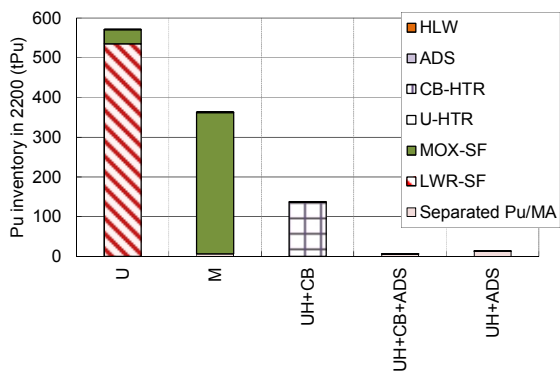


- ✓ CBをスキップして、直接ADSでPu+MA核変換
- ✓ U-HTR66基、ADS33基
- ✓ CB-HTRが無いことで、ADS基数が2倍になっている。
- ✓ Puは14tまで減少



9

まとめ： プルトニウム、MA生成量の比較



- HTRの利用でPuは100トン台に減少。一方、MAは変わらず。
- 更にADSの利用で、Puは10トン前後に減少。MAはガラス固化体の20トンを除いて、5トン前後に減少。

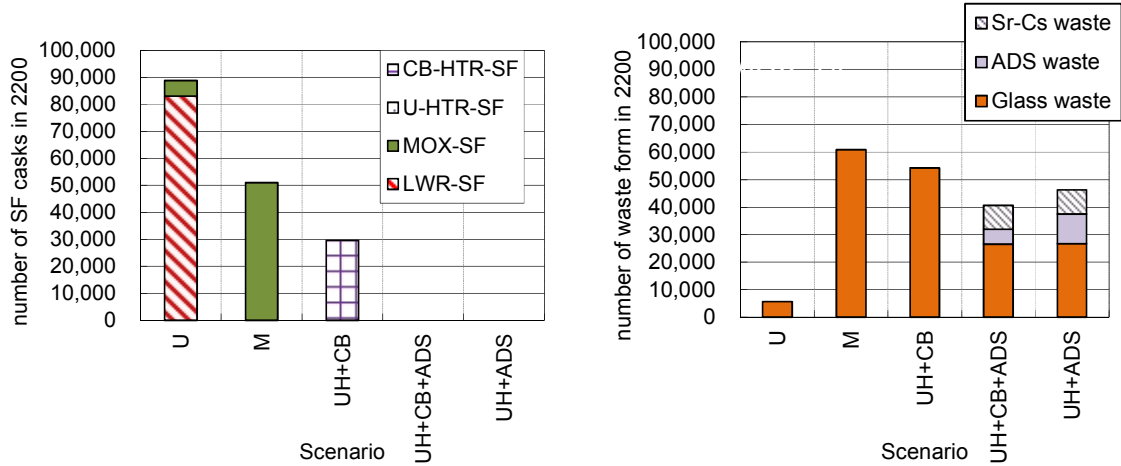
10

廃棄物発生量

直接処分: キャニスタに使用済燃料を格納。処分場温度制限(90°C)から、キャニスタ辺りの集合体本数を決定して、キャニスタ本数を評価

MA分離変換を行わない再処理: 一括してガラス固化。発熱量制限・処分場温度制限を考慮して、ガラス固化体本数を評価。

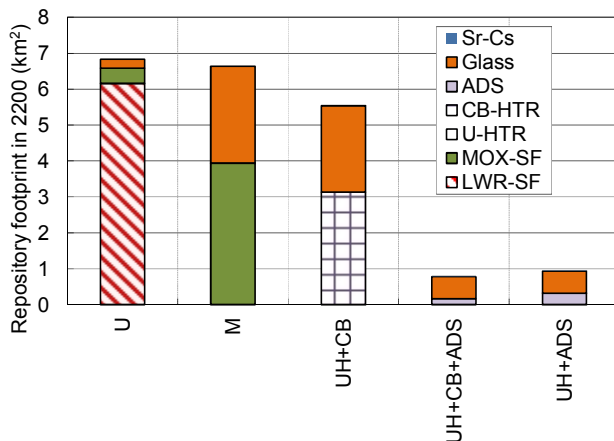
MA分離変換を伴う再処理: 発熱性元素(Sr,Cs)を分離してガラス固化体と同じサイズの焼成体とする。その他のFPは白金属を分離してFP高含有のガラス固化体とする。



- HTR, ADSを導入することで、サイズの大きいキャニスタから、ガラス固化体サイズへの移行が進む。

11

処分場面積



キャニスタ直接処分: 50年冷却後、縦置き

MA分離変換を行わない再処理: 50年冷却後、縦置き

MA分離変換を伴う再処理: Sr,Cs焼結体 長期貯蔵(300年)後、集積配置

ガラス固化体 50年冷却後、集積配置

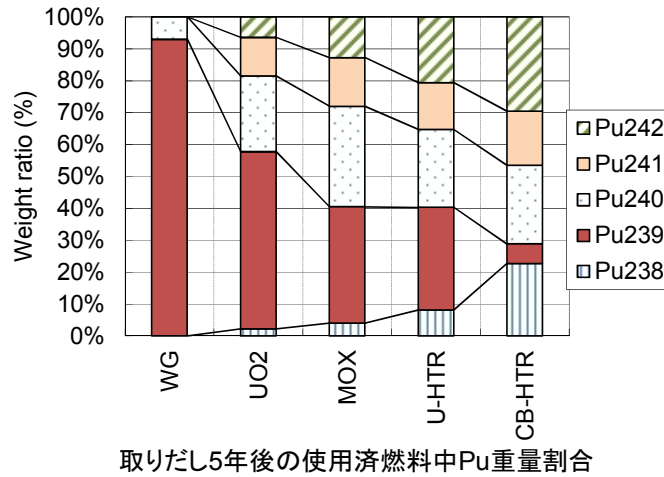
ADS廃棄物 発熱量に応じて縦置き、又は、集積配置

- HTRのみ導入では、処分場面積はあまり変わらない。
- ADS導入で、1/10程度に減少する。

12

プルトニウム同位体比の比較

ADSを導入しないシナリオでは、処分場にPuが直接処分される。
→核拡散抵抗性は？



- U-HTRはMOXよりもfissileが少ない。
- CB-HTRでは、Pu239割合が6%まで減少。

13

核拡散抵抗性の評価指標の例

C. G. Bathke, et. al, Global 2009

- 臨界質量
- 熱
- 自発核分裂
- 線量

FOMを提唱

$$FOM = 1 - \log_{10} \left(\frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{MS}{6.8 \cdot 10^6} + \frac{M}{50} \left(\frac{D}{500} \right)^{\frac{1}{\log_{10} 2}} \right)$$

G. Kessler, NSE, 155, 55-73 (2007)

- 発熱(熱伝導解析と爆薬発火点に基づく)

B. Pellaud, J. NMM, 31(1) (2002)

- 自発核分裂

IAEA

- Pu238が80%以上でSGから除外。

14

臨界質量

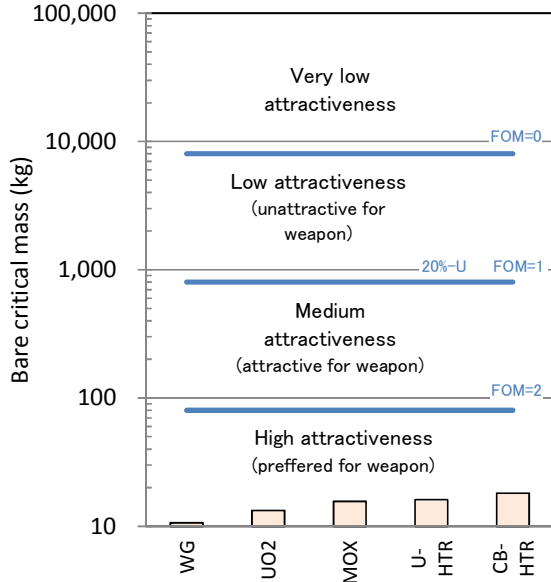


表 臨界質量

	WG	UO2	MOX	U-HTR	CB-HTR
BCM(kg)	10.6	13.3	15.6	16.1	18.1
Bathke	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6

FOM指標では大きな差はない。

15

発熱

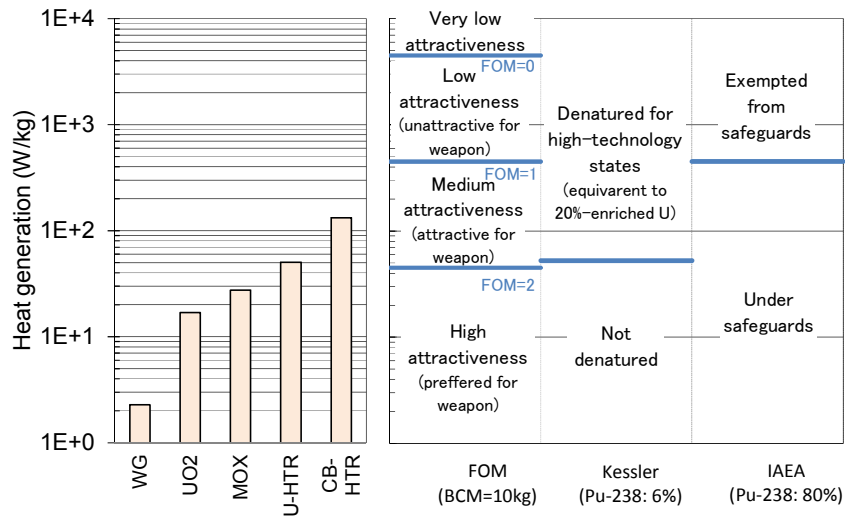


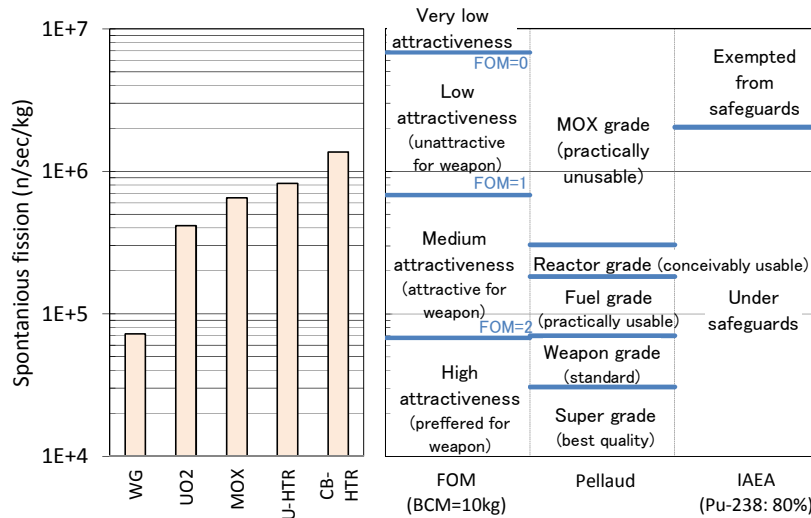
表 発熱 (W/kg)

- FOMの"Medium"に属する。
- CBでは、KesslerのDenatureの基準に達する。

	WG	UO2	MOX	U-HTR	CB-HTR
Heat(W/kg)	2.3	16.9	27.6	50.4	134
Bathke	3.3	2.3	2.0	1.7	1.3
Kessler	Not de.	Not de.	Not de.	Not de.	Denatured
IAEA	Under SG	Under SG	Under SG	Under SG	Under SG

16

自発核分裂



FOM指標の“Low”に属する。

	WG	UO2	MOX	U-HTR	CB-HTR
SF(/sec/kg)	7.2E+4	4.1E+5	6.5E+5	8.2E+5	1.4E+6
Bathke	1.9	1.1	0.8	0.7	0.4
Pellaud	WG	MOX	MOX	MOX	MOX
IAEA	Under SG	Under SG	Under SG	Under SG	Under SG

17

核兵器としての魅力度の比較

	臨界質量	自発核分裂			発熱			製作時被ばく線量
		Bathke	Pellaud	IAEA (under SG?)	Bathke	Kessler (not denatured?)	IAEA (under SG?)	
WG	○	○	○	○	○	○	○	
原子炉級	○	△	△~×	○	○	○	○	
MOX級	○	×	×	○	○	○	○	
U-HTR	○	×	×	○	○	○~△	○	
Pu-HTR	○	×	×	○	○	△	○	

○=核兵器に適する。 △=中庸 ×=適さない

自発核分裂と発熱量が増加することで、核兵器としての魅力度が下がる。加えて、CB-HTRではYSZ燃料を用いているため、再処理によるPuの取り出しが困難。

評価結果のまとめ

Pu, MA量

- U-HTRとCB-HTRの導入でPu量が大幅に下がる。(530トン→100トン台)
- ADSの導入で、PuとMAがほぼ全量核変換される。
 - CB-HTRでPuの大部分を核変換しておくことで、ADSの導入基数を半分に出来る。

処分場

- ADSを導入しない場合、処分場の規模は軽水炉ワンスルーと同等。
- ADSを導入することで、処分場規模を1/10程度にできる。

核拡散抵抗性

- ADSを導入せずPuを処分する場合、 $UO_2 \rightarrow MOX \rightarrow U\text{-HTR} \rightarrow CB\text{-HTR}$ で、核不拡散抵抗性が向上。

Pu・MA核変換性能の高いガス炉・ADSの設計、及び、組み合わせを模索。
技術実現性、安全性、施設規模(コスト)、等の技術情報を整備。
→ 技術選択の判断材料を提示していく。

2.4 クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (4)燃料製造に関する検討

植田祥平、相原 純、水谷義隆、大橋弘史、坂場成昭、橘 幸男、國富一彦



クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (4)燃料製造に関する検討

原子力機構 植田祥平 相原純 水谷義隆※ 大橋弘史
坂場成昭 橘幸男 國富一彦

(※原燃工)

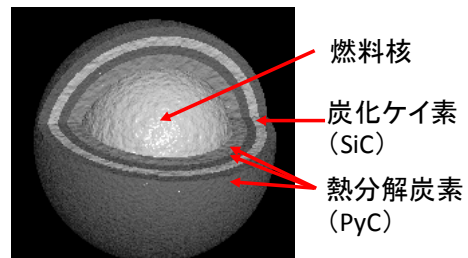
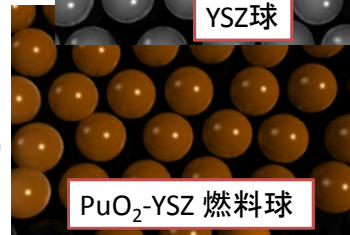
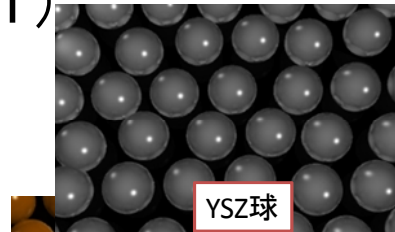
日本原子力学会「2013年秋の大会」 2013年9月4日 八戸工業大学 G38

1



背景と目的(1)

- クリーン燃焼高温ガス炉(CBHTR)
 - ワンスルー方式の直接地層処分
 - 高い核拡散抵抗性
 - 高い燃焼度(約550GWd/t)
- 不活性母材燃料 : PuO_2 -YSZ 被覆燃料粒子
 - 不活性母材:YSZ(イットリア安定化ジルコニア)
 - 蛍石型構造:燃料物質(UO_2 、 PuO_2 、アクチノイド化合物)と同じ
 - Zrを主成分、臨界性への影響は低
 - 被覆燃料粒子
 - セラミックス被覆層が核分裂生成物(FP)を粒子内部に密封・保持
 - YSZ同様に高い化学的安定性



化学的・地質学的に安定、
Puの化学的抽出を困難にするメリット

被覆燃料粒子

2



背景と目的(2)

- YSZ 被覆燃料粒子の研究開発課題
 - ① 設計
 - YSZ被覆燃料粒子の破損機構を解明、定式化
 - ② 製造
 - HTTRで確立したUO₂被覆燃料粒子の製造技術の適用可能性

- 目的
 - CBHTR用YSZ 被覆燃料粒子の設計・製造に係る基盤技術の確立

- 発表内容
 - YSZ 被覆燃料粒子の研究開発計画
 - ① 設計研究
 - ② 製造研究

3

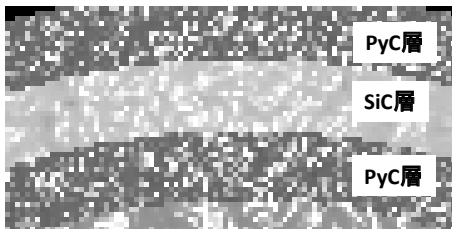
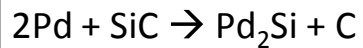


①設計研究

被覆燃料粒子の主要な破損機構(ウラン燃料)

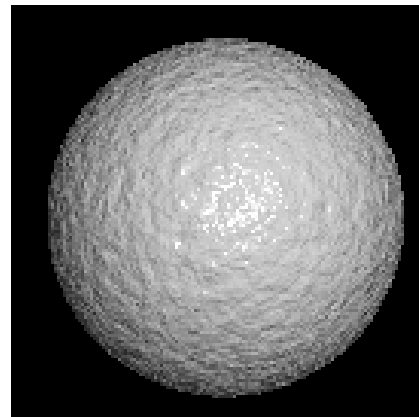
パラジウム(Pd)によるSiC層の腐食破損

PdとSiCの化学反応による破損



内圧破損

燃料核で生成したFPガス、余剰酸素に起因するCOガスにより被覆層に高い応力が作用、被覆層が破損

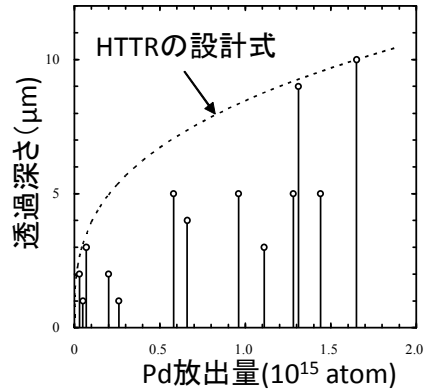


4



①設計研究 - PdによるSiC層の腐食破損

- HTTR(ウラン燃料)
 - PdとSiC層の反応量の相関
 - Pd放出に対する最大透過深さは1/3乗の関数
- CBHTR
 - PuによるPdの収率(100倍程度高)
 - 核分裂性Puモル分率(3倍程度高)
 - CBHTRの燃焼度(17倍程度高)
- 先行研究(米国GA社の事例)
 - PuO₂被覆燃料粒子
 - 燃焼度750GWd/tでもSiC層は健全性を維持
 - HTTRの設計式は直接適用できない?



Minato, et al., J. Nucl. Mater. (1990), Saito, et al. (1994).を参考に作成

- SiC層厚さの設計のためには、YSZ燃料核内でのPd挙動(拡散、保持能)を把握する必要性
 - 実際に照射試験で調べるのが重要

Miller, GA document 906939/Rev.N/C, 1985.を参考に作図



①設計研究 - 内圧破損

- HTTR(ウラン燃料)
 - 既存のUO₂被覆燃料粒子で内圧破損解析コードを開発
- CBHTR
 - YSZ燃料核からのFPガス放出率が不明
 - 遊離酸素に由来するCOガス生成量が不明

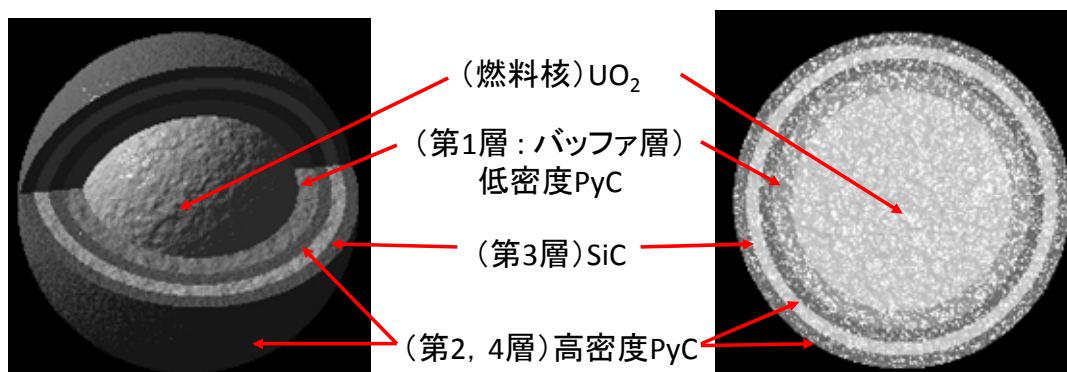
- 既存の内圧破損解析コードをYSZ燃料向けに改良・整備
 - 中性子照射量に対するYSZ燃料からのFPガス放出量を評価
 - JAEAの先行研究等で得られたPu及びUの岩石型燃料からのFPガス放出データ等を参考活用する
 - 遊離酸素に由来するCOガス生成量を評価
 - 熱化学平衡論にもとづく評価

Pd腐食破損や内圧破損をモデル化し、YSZ被覆燃料粒子の設計仕様(燃料核直径、被覆層厚さ等)を決定していく。



②製造研究 被覆燃料粒子の製造工程(HTTR燃料)

- 燃料核工程 : Sol-Gel法(外部ゲル化法)
- 被覆工程 : 化学蒸着法(4層連続被覆)



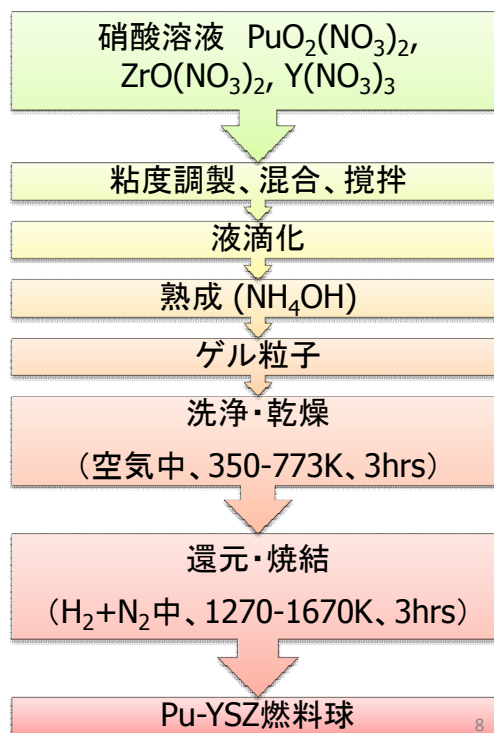
7



②製造研究 – 燃料核工程

- 目標:核分裂性Puを80%燃焼
 - Puモル分率20~50%
 - 理論密度95%
- 日本国内の経験
(HTTR燃料、UO₂-YSZ燃料球)
 - 振動滴下-ゾルゲル法を確立

- 模擬物質による製造試験
 - Pu-YSZの化学特性に近いCe-YSZまたはU-YSZを利用
- 製造条件パラメータと物性の相関を定量的に評価
 - 寸法、真球度、化学組成、密度、結晶構造、等
- 実燃料による試験、遠隔操作技術開発



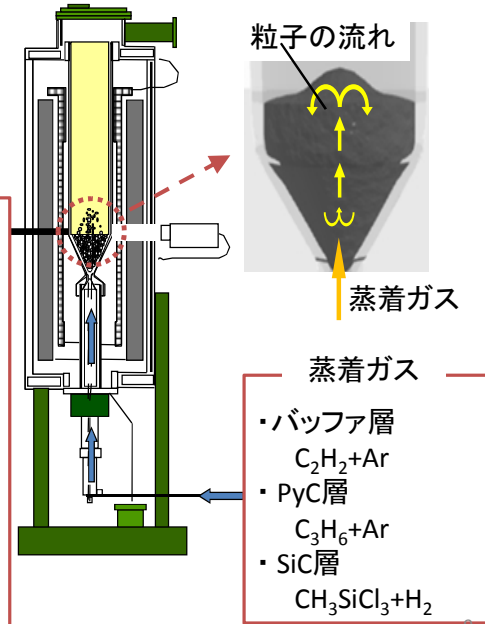
8



②製造研究 – 被覆工程

- HTTR(ウラン燃料)
 - 「流動床-化学蒸着法」の技術を確立
- CBHTR
 - 技術的には大きな変更なし
 - 燃料検査法の開発が必要

- 被覆燃料粒子の製造試験
 - Ce模擬核による予備試験
 - 被覆条件パラメータと物性の相関
 - 温度、原料ガス濃度・流量、処理時間、等
 - 検査技術開発
 - 密度、C/Si比、異方性、破損率、等
 - 最終的に実燃料で実施
 - 実燃料による遠隔操作技術開発、検査技術の実証を実施



まとめと今後の展開

- CB-HTGR用YSZ 被覆燃料粒子の設計・製造に係る基盤技術の確立を目的とした研究計画を立案
 - ① 設計研究
 - PdによるSiC層の腐食破損
 - 内圧破損
 - ② 製造研究
 - 燃料核工程
 - 振動滴下-ゾルゲル法
 - 被覆工程
 - 流動床-化学蒸着法
- 今後の展開
 - 設計 : 破損機構のモデル化、解析評価の実施
 - 製造 : 模擬材による試作試験、Pu使用施設の確保準備

3.おわりに

クリーンバーン高温ガス炉システムの検討状況および課題を把握する目的で、2013年9月3日(火)～5日(木)に開催された日本原子力学会 2013年秋の大会におけるクリーンバーン高温ガス炉のシリーズ発表に関しまとめた。

クリーンバーン高温ガス炉システムは、プルサーマルによるプルトニウム燃焼よりも安全で高い核拡散抵抗性および高い燃焼効率を持つ高温ガス炉を用いたプルトニウム専焼システムである。その概念、検討状況及び課題は以下のようにまとめられる。

○全体概要

クリーンバーン高温ガス炉システムの特徴は、軽水炉使用済燃料からの Pu を化学的に不活性な YSZ(Yttria-Stabilized Zirconia)を母材とする PuO_2 -YSZ 被覆燃料粒子を用いた燃料を用いる点にある。被覆粒子の SiC 層および YSZ 燃料核の地下水環境における耐食性の高さにより直接地層処分に適している。燃焼後に高温ガス炉ウラン炉心による再照射により更なる核変換も可能であり、ADS に接続することによる、全アクチノイド核種の核変換を行うことも可能である。また、現行再処理において、Pu 精製後にウランの代わりに YSZ 硝酸溶液（硝酸 Y 溶液、硝酸 Zr 溶液）と混合することにより、日米再処理交渉の枠組みの中での燃料の製造が可能となる。なお、通常の U との混合とは異なり、燃焼時に燃料の母材からの新たな Pu の生成を回避出来るため高い Pu 燃焼効率が期待できる。なお、混合された Pu・YSZ 硝酸溶液は脱硝工程を省き直接ゾルゲル法を用いた燃料製造ラインに接続されるため、製造過程における核拡散抵抗性の高さも期待できる。なお、YSZ 燃料は硝酸に溶けにくく Pu の回収が困難であり高い核拡散抵抗性を持つ燃料であると言える。また、高温ガス炉を用いることにより安全性の高い Pu の燃焼が期待できる。安全性を示す例としては、冷却材流量喪失時においても制御棒操作を行うことが無く自然に安定な状態へ静定する。炉心構造材である高密度黒鉛は、空気侵入時でも燃えず火災は発生しない。炉心に水および金属が無いので水素が発生しない等が挙げられる。

○核設計

核設計に関しては、熱出力 600MW の高温ガス炉商用炉設計である GTHTR300 をベースに設計が行われている。 PuO_2 -YSZ は、 PuO_2 、YSZ 共に蛍石型の結晶構造を持つことから、その組成（モル分率）が自由に決定できる。Pu インベントリを保存する形でパラメーターサーベイが行った結果、モル分率を変化させても達成燃焼度が変わらない結果が得られた。一方で、燃焼初期における余剰反応度および燃焼反応度欠損は PuO_2 のモル分率を低下させることにより低減できることが分かった。これは、二重非均質性の低下による影響であり、 PuO_2 モル分率 30%程度に設定することにより、BP を用いなくても余剰反応度の小さな炉心の設計ができることを示している。なお、YSZ 添加による中性子捕獲の影響は無視できる程度であることも確認された。パラメーターサーベイの結果を受けて 3次元モデルによる平衡炉心をモンテカルロ法中性子輸送コード MVP により実施した。シャッフリングパターンとしては、GTHTR300

で提案された新燃料で古い燃料を挟むサンドイッチパターンと、新燃料を中心に配置する In-Out パターンに対し実施した。炉心性能は MA を添加する場合と添加しない場合に対し行われ、MA を添加しない場合は取出し燃焼度 700Gwd/t であり、核分裂性物質のほぼ全量の燃焼が可能である。MA を添加する場合、燃焼度は 500Gwd/t 程度に低下し、Pu-239 の消費率で 95%、核分裂性物質全体の消費率で 80%と Pu 燃焼効率が低下する。一方で、MA を添加した場合は、地下水に溶けやすい Th-229、Np-237 に壊変し地層処分時において問題となる 4N+1 崩壊系列の核種の 40%程度の燃焼が可能となる。さらに、クリーンバーン高温ガス炉使用済燃料を再処理することなく U 燃料高温ガス炉で再照射することにより、さらなる核変換の実現が期待できる。MA 添加炉心に対し取出し燃焼度 500Gwd/t の燃料が 740Gwd/t 程度まで燃焼が促進され、核分裂性物質のほぼ全量、TRU の 74%程度が燃焼可能であるとの見通しが得られた。

○シナリオ検討

シナリオ検討に関しては、原子力縮小継続シナリオを仮定し、2030 年から原発の新設を再開し、発電容量の総量は 20GWe とする。なお、新設炉としては高温ガス炉のみではなく、比較のため軽水炉も考慮している。評価シナリオとしては「U 燃料軽水炉のみ」、「U 燃料軽水炉およびプルサーマル」、「U 燃料高温ガス炉およびクリーンバーン高温ガス炉」、「U 燃料高温ガス炉、クリーンバーン高温ガス炉および ADS」、「U 燃料高温ガス炉および ADS」の 5 シナリオである。評価項目としては、「Pu インベントリ」、「MA インベントリ」、「廃棄物発生量」、「処分場占有面積」、「使用済燃料中の Pu の組成および核拡散抵抗性」と多岐にわたる。主な結論は以下のとおりである。クリーンバーン高温ガス炉の導入により、再処理により得られる分離 Pu のピークが 530t から 100t 程度へと大幅に削減が可能である。ADS の導入により Pu 及び MA の全量の核変換が可能である。さらに、ADS 導入シナリオにおいてクリーンバーン高温ガス炉を併用した場合は経済的に高額な ADS の導入基数を半減させることができる。このようにクリーンバーン高温ガス炉を導入することにより多様な導入効果が得られることが確認された。

○燃料製造に関する検討

燃料設計・製造に関しては、YSZ 被覆燃料粒子に関する研究課題として、燃料設計について YSZ 被覆燃料粒子の破損機構の解明および定式化、燃料製造について HTTR で確立した UO_2 被覆燃料粒子の製造技術を YSZ 燃料製造へ適用するための技術開発が必要である。設計研究においては、クリーンバーンの高温ガス炉ではウラン炉心(HTTR)と比較して Pd による SiC 層の腐食ならびに粒子内部ガス圧力による破損機構の解明が重要である。Pd による SiC 層の腐食破損に関しては、ウラン燃料について Pd と SiC 層の反応率の相関が得られており、Pd 放出に対する最大浸透深さは 1/3 乗の関数で与えられている。クリーンバーン高温ガス炉ではウラン炉心(HTTR)と比較して Pu の Pd 収率は U の 100 倍程度高く、核分裂性物質のモル分率は 3 倍程度高く、燃焼度は 17 倍程度高い。一方で、GA 社の PuO_2 被覆粒子燃料が 750Gwd/t の高燃焼度でも SiC 層の健全性が確認されている照射実績により、HTTR の設計式が直接適用でき

ない恐れがある。結論として SiC 層厚さの設計のためには、YSZ 燃料核内での Pd の挙動の把握が必要であり、実際の照射試験での調査が重要である。内圧破損に関しては、ウラン炉心 (HTTR) に関しては内圧破損解析コードが開発されている。一方で、クリーンバーン高温ガス炉に関しては、YSZ 燃料核からの FP ガス放出率および遊離酸素に由来する CO ガス生成量が不明である。そのため、既存のコードを YSZ 燃料に向け改良・整備する必要がある。中性子照射量に対する YSZ 燃料からの FP ガス放出量の評価には JAEA の先行研究で得られた Pu および U の岩石型燃料からの FP ガス放出データ等が参考になる。遊離酸素に由来する CO ガス生成量評価に関しては熱化学平衡論に基づく評価により予測が可能である。これらの、Pd 腐食破損および内圧破損のモデル化により YSZ 被覆燃料粒子の設計が行えるようになる。製造工程に関してはゾルゲル法による燃料核工程と化学蒸着法による被覆工程に分けられる。燃料核製工程に関しては、Pu-YSZ の代わりに化学特性の近い Ce-YSZ もしくは U-YSZ による製造試験を行う。製造条件パラメータと寸法、真球度、化学組成、密度、結晶構造等の物性等の相関を定量的に評価する。実燃料による試験、遠隔操作技術の開発等を行う必要がある。被覆工程に関しては、ウラン燃料 (HTTR) に対し「流動床-化学蒸着法」の技術が確立されており、クリーンバーン高温ガス炉燃料に対しても、技術的に大きな変更は無いと思われるが、燃料検査法の開発は必要である。被覆燃料粒子の製造試験としては、Ce 模擬核による予備試験を行う。温度、原料ガス濃度・流量、処理時間等の被覆条件パラメータと物性値との相関を確認する必要がある。検査技術開発に関しては、密度、C/Si 比、違法性、破損率等の検査項目があり、開発が必要である。最終的には実燃料での実施が必要である。実燃料による遠隔操作技術の開発および検査技術の実証を実施する必要がある。

上記のように、クリーンバーン高温ガス炉に関し、原子炉システムとしての概念、核設計、導入効果評価、燃料製造に関する検討がなされている。現在の検討内容および今後の研究開発の方向性が確認された。

謝 辞

クリーンバーン高温ガス炉概念を検討するにあたり、多くの方々からのご支援・ご教示をいただきました。この場をもちまして御礼申し上げます。特にシリーズ発表の著者として参加していただきました、日本原子力研究開発機構、原子力水素・熱利用研究センターの後藤 実様、植田祥平様、相原 純様、大橋弘史様、坂場成昭様、橘 幸男様、國富一彦様、原子力基礎工学研究部門の西原健司様、辻本和文様、東京工業大学の千葉 敏教授には改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁(編): “原子力立国計画 日本の選択”, 日本電気協会新聞部, 383p.,(2006).
- 2) 橘川武郎: “電力改革 エネルギー政策の歴史的転換”, 株式会社講談社, 245p.,(2012).
- 3) 橘川武郎: “エネルギー基本計画の見直しについて-ベストミックスを考える視点- (総合資源エネルギー調査会・基本問題委員会第2回会合資料4)”,
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/2nd/111026-4.pdf>
- 4) 内閣官房: “エネルギー・環境会議”,
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive01.html>
- 5) 国家戦略室: “エネルギー・環境に関する選択肢【概要】”,
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120713/gaiyo.pdf>
- 6) エネルギー・環境会議: “革新的エネルギー・環境戦略”,
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20120914/20120914_1.pdf
- 7) 内閣府原子力委員会: “新大綱策定会議”,
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki_sakutei.htm
- 8) 内閣府 原子力政策担当室: “代表シナリオの評価を踏まえた制作選択肢の総合評価 (案) (新大綱策定会議 (第18回) 資料第1-2号)”,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryu/sakutei18/siryu1-2.pdf>
- 9) 河野太郎: “原発と日本はこうなる 南に向かうべきか、そこに住み続けるべきか”, 株式会社講談社、東京都文京区、pp.1-247,(2011).
- 10) 内閣府原子力政策担当室: “我が国のプルトニウム管理状況(第34回原子力委員会資料第1号)”,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2013/siryu34/siryu1.pdf>
- 11) 日本原子力学会: “日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集”, 日本原子力学会, (2013).
- 12) 後藤 実, 深谷裕司, 大橋弘史 他: “クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (1)全体概要”, 日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集,G35,青森県八戸工業大学, 9/3-5,(2013).
- 13) 深谷裕司, 後藤 実, 大橋弘史 他: “クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発 (2)核設計”, 日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集,G36,青森県八戸工業大学, 9/3-5,(2013).

- 14) 西原健司, 辻本和文, 深谷裕司 他: “クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発
(3)シナリオ検討”, 日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集,G37, 青森県八戸工業大学,
9/3-5,(2013).
- 15) 植田祥平, 相原 純, 水谷義孝 他: “クリーン燃焼高温ガス炉の研究開発
(4)燃料製造に関する検討”, 日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集,G38, 青森県八戸工業大
学, 9/3-5,(2013).
- 16) 千葉 敏: “総合講演・報告 5「高温ガス炉の課題と解決法 (安全性、経済性、持続可能性)」
(3) 高温ガス炉の持続可能性 -クリーン燃焼高温ガス炉と ADS による TRU 変換システム
を用いたバックエンド問題の解決-”,
日本原子力学会 2013 年秋の大会予稿集,OV09, 青森県八戸工業大学, 9/3-5,(2013).

This is a blank page.

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
物質の量	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 ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
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 ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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。実際には、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称と記号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に使用される。
 (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間は同一である。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	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	1 h=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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

