JAEA-Research 2023-002

DOI:10.11484/jaea-research-2023-002

商用高温ガス炉使用済燃料の再処理廃棄物処分に 関する研究

Study on Disposal of Waste from Reprocessing for Commercial HTGR Spent Fuel

深谷 裕司 丸山 貴大 後藤 実 大橋 弘史 樋口 英明

Yuji FUKAYA, Takahiro MARUYAMA, Minoru GOTO, Hirofumi OHASHI and Hideaki HIGUCHI

高速炉·新型炉研究開発部門 炉設計部

Reactor Systems Design Department Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

June 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(https://www.jaea.go.jp) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

商用高温ガス炉使用済燃料の再処理廃棄物処分に関する研究

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 炉設計部

深谷 裕司、丸山 貴大+1、後藤 実、大橋 弘史、樋口 英明+2

(2023年2月14日受理)

商用高温ガス炉使用済燃料の再処理に由来する廃棄物の処分に関する研究を行った。軽水炉の再処理と高温ガス炉の再処理では燃料の構造の違いによる大きな違いがあるため、軽水炉に対して制定された再処理の廃棄物処理に関する法律の高温ガス炉廃棄物への適用性を確認すべきである。そこで、技術の違いを比較するとともに、全炉心燃焼計算を用いて、黒鉛廃棄物の放射化量及び表面汚染による放射能濃度を評価することにより、再処理廃棄物について比較を行った。その結果、SiC 残渣廃棄物は、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(2000 年法律第 117 号)の第二種特定放射性廃棄物として軽水炉のハル・エンドピースと同様に地層処分されるべきことが分かった。黒鉛廃棄物については、軽水炉のチャンネルボックスと同様に、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(1957 年法律第 166 号)の第二種廃棄物としてピット処分による浅地中処分されるべきことが分かった。

本報告書は高速炉・新型炉研究開発部門が表題の検討内容に対し技術的検討を行った内容に対し、総務部 法務・文書課が法解釈の検討を行ったものである。

大洗研究所: 〒311-1393 茨城県東茨城群大洗町成田町 4002 番地

- +1 総務部
- +2 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター

Study on Disposal of Waste from Reprocessing for Commercial HTGR Spent Fuel

Yuji FUKAYA, Takahiro MARUYAMA⁺¹, Minoru GOTO, Hirofumi OHASHI and Hideaki HIGUCHI⁺²

Reactor Systems Design Department
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 14, 2023)

A study on disposal of waste derived from commercial High Temperature Gas-cooled Reactor ("HTGR") has been performed. Because of significant difference between the reprocessing of Light Water Reactor ("LWR") and that of HTGR due to difference in structures of the fuel, adoptability of the laws relating to reprocessing waste disposal, which is enacted for LWR, to HTGR waste should be confirmed. Then, we compared the technologies and waste of reprocessing and evaluated radioactivity concentration in graphite waste by activation and contamination based on whole core burn-up calculation.

As a result, it was found that SiC residue waste should be disposed of into a geological repository as 2nd class designated radioactive waste in the Designated Radioactive Waste Final Disposal Act (Act No.117 of 2000), by way of amendment of the applicable order, same as hull and end-piece of LWR, and graphite waste should be shallowly disposed of than geological disposal as 2nd class waste for pit disposal in the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Act No.166 of 1957) same as a channel box of LWR.

Keywords: Waste Disposal, HTGR, Reprocessing, Laws

This work was performed by Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development for the technical investigation and by Legal and Documents Section, General Affairs Department for the legal investigation.

- +1 General Affairs Department
- +2 Nuclear Science and Engineering Center, Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research

目 次

1.	. 糸	者言	1
2.	·	… 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特徴	2
		高温ガス炉から発生する使用済燃料の特徴と再処理法	
	2.2	? 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特徴	3
	2.3	3 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の放射化量及び汚染量の評価法	4
3.		高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の処分の法解釈に係る最終処分法及び炉規法上の	
	í	各廃棄物該当性並びに社会実装のための解決法	8
	3.1	最終処分法の目的及び性格	8
	3.2	? 最終処分法上規定される特定放射性廃棄物の種類	8
	3.3	3 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の最終処分法上の特定放射性廃棄物該当性	- 10
4.	. 均	戸規法の目的及び性格	- 12
5.	. 均	戸規法上規定される廃棄物の種類	- 12
6.		高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物のうち黒鉛廃棄物の	
	É	第一種廃棄物・第二種廃棄物該当性及びその処分方法	- 13
7.		書言	- 15
譲	辞-		- 16
参	考	文献	- 17

Contents

1.	Introduction	1
2.	Characteristics of HTGR Spent Fuel Reprocessing Waste	2
	2.1 Characteristics of HTGR Spent Fuel from HTGR and Reprocessing Method	2
	2.2 Characteristics of HTGR Spent Fuel Reprocessing Waste	3
	2.3 Evaluation Methods for Amount of Activation and Contamination	
	of HTGR Spent Fuel Reprocessing Waste	4
3.	Applicability of Each Waste under Final Disposal Act and Act on Regulation	
	of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors	
	to Legal Interpretation of Disposal of HTGR Spent Fuel Reprocessing Waste,	
	and Solutions for Social Implementation	8
	3.1 Purpose and Characteristics of Final Disposal Act	8
	3.2 Types of Specified Radioactive Wastes	
	under Final Disposal Act of Radioactive Wastes	8
	3.3 Applicability of HTGR Spent Fuel Reprocessing Waste to Specific Radioactive	
	Wastes under Final Disposal Act	10
4.	Purpose and Character of Act on Regulation of Nuclear Source Material,	
	Nuclear Fuel Material and Reactors	12
5.	Types of Wastes Regulated by Regulation of Nuclear Source Material,	
	Nuclear Fuel Material and Reactors	12
6.	Applicability of Graphite Wastes in HTGR Spent Fuel Reprocessing Wastes	
	as Class I or II Waste and its Disposal Method	13
7.	8	
A	cknowledgements	16
Re	eferences	17

表リスト

Table 2.1	Major specifications of GTHTR300	6
Table 2.2	Impurities in graphite (ppm)	6
Table 3.1	Radioactivity in graphite waste and legal lower limit for 2nd class	
	designated radioactive waste in the Designated Radioactive Waste Final	
	Disposal Act (Bq/t)	1
Table 6.1	Radioactivity in graphite waste and legal lower limit for 1st class waste	
	disposal in the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear	
	Fuel Material and Reactors (Bq/t)14	4
Table 6.2	Radioactivity in graphite waste and legal upper limit for pit disposal	
	as 2nd class waste disposal in the Act on the Regulation of Nuclear	
	Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Bq/t)	5
Table 6.3	Radioactivity in graphite waste and legal upper limit for trench disposal	
	as 2nd class waste disposal in the Act on the Regulation of Nuclear	
	Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Bq/t)	5
	図リスト	
Fig. 2.1	Difference between HTGR fuel and LWR fuel	3
Fig. 2.2	Head-end process of HTGR reprocessing	4
Fig. 2.3	Core geometry of GTHTR300	
Fig. 2.4	Reloading scheme of sandwich shuffling	7

This is a blank page.

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所事故 1)以降、高温ガス炉はその高い安全性 2)が注目され、「エ ネルギー基本計画」3)、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」4)、「成長戦 略実行計画」5及び「統合イノベーション戦略 2021」6に開発すべき技術課題と明記され、将来 の発電用原子炉や水素製造用原子炉として期待されるとともに、国際協力の下で研究開発が実 施されている。特に、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、高い安 全性と水素製造に関する期待が記述されるとともに、当機構の所管する高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いた安全性の国際実証、水素製造技術開発、国際協力による技術開発・実証、 HTTR で培った技術による規格基準の国外への普及と明確な開発計画が示されており、高温ガ ス炉がカーボンニュートラル実現の手段として期待されていることが分かる。国立研究開発法 人日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)では、商用高温ガス炉概念として電 気出力約 300MW の高温ガス炉ガスタービン発電システム(Gas Turbine High Temperature Reactor、以下「GTHTR300」という。) ⁷の概念を完成させている。GTHTR300 については、 設計研究の全体計画 7)、安全設計方針 8)、燃料設計 9,10)、核熱流動設計 11)、発電系設計 12)、保 守・点検 13.14)、再処理 15)及び発電原価評価 16)が報告されている。これらの研究開発は、旧電源 開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として旧日本原子力研究所が実施 した「核熱利用システム技術開発」の成果である。

このように、高温ガス炉の現行軽水炉の核燃料サイクルへの技術的適合性は確認されている。 なお、現行軽水炉核燃料サイクルを技術変更により、高温ガス炉へ適合させたものを「高温ガ ス炉サイクル」という。一方、現在の原子力関係法令は既存の軽水炉サイクルを想定して整備 されたものといえ、高温ガス炉サイクルから発生する廃棄物に対しては、核原料物質、核燃料 物質及び原子炉の規制に関する法律(以下「炉規法」という。)等の適用可否検討が必要である。 また、原子炉の運転から発生する放射性廃棄物の処分に関しては、当初、廃棄の事業に関する 規制として炉規法により規定されていたが、平成 12 年に特定放射性廃棄物の最終処分に関す る法律(以下「最終処分法」という。)が制定されたことにより、廃棄物の区分の状況が複雑化 した。最終処分法で規定される廃棄物は、地下 300m 以深に地層処分を行う必要があるが(最 終処分法第2条第2項、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施行令(以下「最終処分法 施行令」という。)第1条)、最終処分法は、「発電用原子炉の運転に伴って生じた使用済燃料の 再処理等を行った後に生ずる特定放射性廃棄物」をその対象に置いており、この枠組みに当て はまらないものについては、炉規法の守備範囲となる。さらに、発電用原子炉の運転に伴って 生じた使用済燃料の再処理によって生じる廃棄物(以下「使用済燃料再処理廃棄物」という。) については、①高レベル放射性廃棄物、②いわゆる TRU (TRans Uranium) 廃棄物のほか、 最終処分法における③第一種特定放射性廃棄物、④第二種特定放射性廃棄物、炉規法における ⑤第一種廃棄物、⑥第二種廃棄物の六つの区分が重畳的に存在し、使用済燃料再処理廃棄物の 処分に係る法的解釈を難解なものとしている。

加えて、前述のとおり、現在の原子力関係法令は既存の軽水炉使用済燃料の再処理を念頭に置いて規定されているといえる。例えば、使用済燃料再処理廃棄物に関し、地層処分をすべき

第一種特定放射性廃棄物については、最終処分法は、同廃棄物の定義の一つとして「残存物を固型化した物」と規定しており(最終処分法第2条第8項第1号)、これはいわゆる「ガラス固化体」を指すものといえ、現行法の下では再処理が前提であり、現行軽水炉ですら使用済燃料の直接処分は最終処分法上の立法趣旨として想定されていない。しかし、高温ガス炉における使用済燃料の構造や材料は軽水炉のものと完全に異なるため、高温ガス炉サイクルにより生ずる使用済燃料再処理廃棄物(以下「高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物」という。)が①現行法の下でいかに処分が可能か、又は②現行法の下ではいかなる課題があるのかを確認する必要がある。今後、高温ガス炉の円滑な社会実装を行う上では高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の処分が現行法の想定している範囲内での解釈によって処分ができることを確認すること又は現行法制度によってはその処分が難しい場合にはこれを適正に行い得るための法整備を行う必要がある。そのためには、高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特性を的確に整理した上で、法解釈を示し、場合により法改正案を示す必要があり、これが本研究の目的である。

2. 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特徴

2.1 高温ガス炉から発生する使用済燃料の特徴と再処理法

高温ガス炉の燃料は軽水炉と同様に酸化物燃料の形態をとる。代表炉型の GTHTR300 n はウラン燃料を想定しており、現行軽水炉と同様に二酸化ウラン(UO_2)燃料を用いる。ただし、高温ガス炉燃料では、被覆燃料粒子と呼ばれる三重の構造層で UO_2 燃料核を被覆する TRISO (TRi-ISOtropic) 燃料の形態を採る。具体的には、バッファー層と呼ばれる気体状の核分裂生成物に対するガスプレナムの機能を持つ層の外側に、内側熱分解炭素(IPyC)層、炭化ケイ素 (SiC)層、外側熱分解炭素(OPyC)の三つの構造層により被覆される。更に黒鉛粉末で焼き固め燃料コンパクトとして成形し、黒鉛製の鞘管又は心棒で棒状に固定され、燃料棒を構成する。その燃料棒が黒鉛ブロックに装荷され、燃料体ブロックとなる。最終的に、この燃料体ブロックが炉心に装荷される。なお、この燃料棒は、支持構造に自重により固定されているだけであるので、簡単に引き抜くことが可能である。一方で、軽水炉燃料は、 UO_2 ペレットをジルカロイ(Zry)で作られた被覆管に格納した燃料棒をタイプレートにより東ねたものとなる。沸騰水型軽水炉燃料では、更に燃料棒の束をチャンネルボックスに格納し燃料集合体とする。燃料構造の比較を Fig.2.1 に示す。

ここで、UO₂を取り出し、硝酸溶液に溶解し、溶液濃度を調整する工程まで進めば、高温ガス炉燃料も軽水炉燃料と同様に再処理することが可能である。この再処理工程における溶液濃度調整までの工程を前処理といい、高温ガス炉の技術開発では、高温ガス炉専用の前処理工程の検討を行い、現行計画に基づいた日本原燃株式会社の六ヶ所再処理施設を用いた再処理の成立性 15)が示されている。

軽水炉使用済燃料の前処理では、沸騰水型軽水炉においては、チャンネルボックスを外し回収するものの、タイプレートにより固定された燃料棒の束については、解体せず、そのまません断し、硝酸溶液で溶解する。この際、 UO_2 ペレットは硝酸に溶解するが、被覆管やタイプレートは溶解せずに蓄積する。これを回収した廃棄物を、それぞれ、ハル・エンドピースと呼称

する。

一方で、高温ガス炉燃料の前処理に関しては、米国では、軽水炉と同様、集合体に相当するブロックごと機械的に破砕し、硝酸溶液で回収する方式が試みられた経緯がある。しかしながら、5%程度の未回収のウランが残る ¹⁷⁾など効率的ではない。その改善を目的とし、日本では、さらに、再処理の物量を削減する目的で、上記の燃料棒が簡単に引き抜けるピンインブロック型と呼ばれる燃料方式を用いている ¹⁸⁾。引き抜いた燃料棒は分解され、燃料コンパクトが取り出された後、黒鉛粉末で作られた燃料コンパクト母材と被覆層を燃焼及び SiC 層の破砕により取り除く。

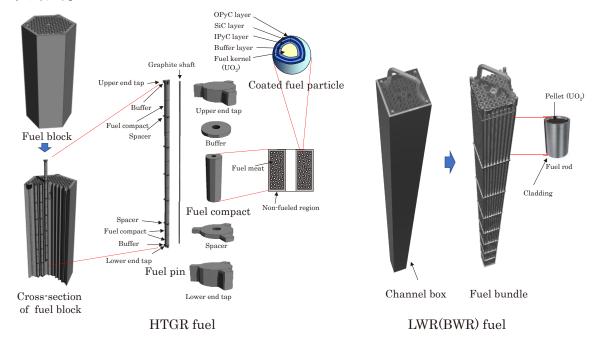


Fig.2.1 Difference between HTGR fuel and LWR fuel

2.2 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特徴

上記のとおり、前処理工程によって得られる使用済燃料を溶解した硝酸溶液を、軽水炉の使用済燃料溶液と同じ組成に調整することにより、高温ガス炉使用済燃料の再処理が六ヶ所再処理施設においても可能 ¹⁵⁾である。高温ガス炉の前処理工程に関しては、これまで、いくつかの方法についての研究開発が行われてきた経緯 ¹⁸⁾がある。燃料棒は前述のように、燃料体ブロックから簡単に引き抜くことができる。燃料棒から燃料核を取り出す工程について、現在の検討においては、①燃料コンパクトの母材及び被覆燃料粒子の OPyC 層を燃焼により除去する燃焼法 ²⁰⁾、②SiC 層を回転ディスクにより挟み込み、機械的に破壊するハードディスククラッシャー法 ²¹⁾、③残りの IPyC 層及びバッファー層を燃焼により除去する再燃焼法 ²¹⁾の組合せを採用 ¹⁵⁾している。その高温ガス炉の前処理工程のフロー図を Fig.2.2¹⁵⁾に示す。一方で、原子力機構ではジェットグラインド法 ¹⁹⁾による前処理システムの実証試験を行ってきたが、ハードディスククラッシャー法に関しては、原子燃料工業株式会社にて検査基準を満たさない被覆燃料粒子からのウラン回収のために使用した実績がある ^{15,22)}。なお、破壊された SiC 層に関しては、取り出された燃料核と一緒に硝酸溶液に投入される。しかし、SiC は耐食性が高いため溶解せず SiC

残渣として回収される。さらに、Fig.2.2のフローにおいて、劣化ウランを混合するラインが存在する。これは、高温ガス炉燃料が濃縮度及び燃焼度が軽水炉燃料の3倍程度あるため、劣化ウランを混合して3.1倍に希釈15するためのもので、軽水炉使用済燃料の溶解液とほとんど同一の組成が得られる。

高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物として、①軽水炉のチャンネルボックス廃棄物に相当する燃料棒を引き抜いた後の黒鉛ブロックの廃棄物である黒鉛廃棄物、②軽水炉のハル・エンドピースに相当する直接的に使用済燃料を溶解した硝酸溶液により汚染されたSiC残渣廃棄物が発生する。③後続の分離工程以降に由来するガラス固化体とする廃棄物は軽水炉と変わりはない。なお、燃料コンパクトを燃焼した際に発生するCOガスを CO_2 ガスと炭素(C)に分解し、炭素を析出させ黒鉛廃棄物として回収し、黒鉛ブロックと同様に処分されるものとする。

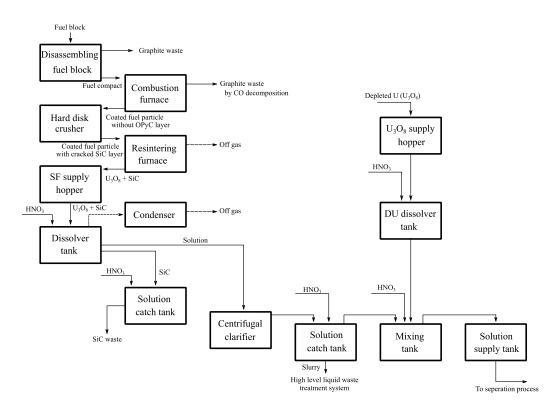


Fig.2.2 Head-end process of HTGR reprocessing¹⁵⁾

2.3 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の放射化量及び汚染量の評価法

廃棄物の処分法を検討する上で、廃棄物に含まれる放射能が廃棄の区分を決定する要因となる。この目的で燃料体ブロックの放射化量及び汚染量の評価を行った。

商用高温ガス炉 GTHTR300¹¹⁾は Fig.2.3 に示すように、熱出力 600MW の炉心の中心部に反射体ブロックを持つ環状炉心と呼ばれる炉心である。高さ 1m の燃料体ブロックが軸方向に 8 段積み上げられている。燃料体ブロックには冷却孔が設けられ、その冷却孔に燃料棒が設置されている。ヘリウムガス冷却材は、燃料体ブロックと燃料棒の間に形成される環状流路を流れ、燃料を冷却する。燃料交換方式は、燃料の炉内滞在期間の半分の時点で半分の燃料を入れ替え

る 2 バッチ方式で、Fig.2.4 に示すように新燃料と旧燃料を軸方向に交互に配置するサンドイッチシャッフリングと呼ばれる装荷方式が採用されている。なお、主な設計諸元を Table.2.1 に示す。

本評価では、不純物の放射化計算を燃焼解析コード ORIGEN²³⁾を用いて行った。ORIGEN コードは 1000 核種程度の燃焼解析が可能で放射化計算に適している。一般的な核設計コードでは、臨界性の再現を目的として 100 核種程度の核種が選定され、炉定数が整備されているため、直接、今回の放射化計算に用いることはできない。一方で、ORIGEN コードはエネルギー1群の断面積ライブラリを整備する必要があり、そのためには、放射化計算の対象領域の中性子スペクトルを評価する必要がある。そこで、初めに、モンテカルロ法に基づく中性子輸送コードを用いた燃焼システムである MVP·BURN²⁴⁾による全炉心燃焼解析によって、平衡炉心を作成した。そのサイクル中期における燃料体ブロックの中性子スペクトルを用いて、ORIGENライブラリを作成 ²⁵⁾した。ORIGEN ライブラリの作成に必要な核種断面積データは JENDL-4.0²⁶⁾に格納されているものを用いることを基本とし、不足分については、各評価済み核データライブラリに格納されているデータを、JEFF-3.1.2²⁷⁾、JENDL/A-96²⁸⁾、JEFF-3.1/A²⁹⁾、TENDL-2011³⁰⁾の順に用いることとした。放射化物の断面積ライブラリについては無限希釈断面積を縮約して用いたが、燃焼解析に用いる断面積に関しては、MVPコードから得られる実効断面積を網約して用いたが、燃焼解析に用いる断面積に関しては、MVPコードから得られる実効断面積を網りている。

放射化計算には黒鉛そのものと、Table 2.2 に示した不純物 31)とを考慮している。なお、検 出されない核種に関しては、保守側の評価を得るため検出下限値(表中で不等号で示された数 値)を想定し解析を行っている。黒鉛材料としては、原子炉級黒鉛である IG-11 と IG-110 を 考慮している。IG-110 は高純度黒鉛である一方で、IG-11 より高価な材料である。経済性の観 点から IG-110 ではなく IG-11 を燃料体ブロックに用いる設計 32)が採用されるに至っている。 しかしながら、黒鉛中の不純物は空気侵入事故時の黒鉛酸化を加速させるため、安全性の観点 から IG-110 を採用する将来的な設計変更も想定し、IG-11 のほかに IG-110 の評価も行った。 なお、不純物の塩素の放射化を処分する上で考慮すべきとの見解 33)があり、塩素に関しても評 価することとした。IG-11 では黒鉛化処理のみを行うが、高純度黒鉛 IG-110 では、黒鉛化処理 と高純度化処理を行う34)。黒鉛の高純度化処理は高温環境で塩素を含むハロゲンガスを流し不 純物と反応させ除去することにより行われる34。一方で、塩素が黒鉛の不純物として残留33)す るおそれがあるため、高純度化処理を行う IG-110 に関し、塩素濃度の測定 34)が行われている。 その結果、イオンクロマト法による測定では有意量の塩素は検出されなかったことから、本検 討では、検出下限濃度の 3ppm34)を想定した。また、黒鉛結晶中の閉気孔に残留する空気に含 まれる窒素の放射化も懸念される。窒素濃度については、保守側に評価し 20ppm¹⁸⁾存在するも のと想定した。これらの黒鉛及び不純物を用い ORIGEN コードにより放射化計算を行った。

表面汚染に関しては、破損燃料粒子の燃料核を構成する物質そのものが流出するような極端な状況を想定 35)して保守側な評価が得られるようにした。高温ガス炉設計では、燃焼による追加破損は無視できる程度 10)であり、燃料製造時に発生する初期破損のみを想定する。初期破損率は高温工学試験研究炉 (HTTR) の燃料製造の実績より 35 、 $_{2}$ ×10 $^{-6}$ という値が得られている。この評価では、燃料全体の $_{2}$ ×10 $^{-6}$ の燃料が燃焼した上に、全て燃料体ブロックに付着した状

態を想定した。この燃焼解析についても上記の ORIGEN ライブラリを用いた。

これらの放射化及び表面汚染による放射能については、次章において、法令によって定められた制限値と共に示す。

Table 2.1 Major specifications of GTHTR300

Item	Value
Thermal power (MWt)	600
Electric generation (MWe)	
Gross:	280
Net:	274
Uranium inventory (t)	7.19
²³⁵ U enrichment (wt%)	14.0
Cycle length (days)	730
Number of batch	2
Averaged discharge burn-up (GWd/t)	120

Table 2.2 Impurities in graphite (ppm)

IG-11				IG-110			
В	2.9	Ni	8.31	В	0.03 Ni <0.1		
Si	0.7	Cr	< 0.1	Si	1.6 Cr <0.5		
Ca	22.32	Co	0.2	Ca	<0.05 Co <0.05		
Fe	9.59	Gd	< 0.05	Fe	<0.01 Gd <0.05		
Al	< 0.4	Sm	< 0.05	Al	<0.05 Sm <0.05		
Na	-	Li	0.06	Na	<0.05 Li <0.01		
K	-	Mg	0.99	K	<0.1 Mg <0.5		
V	177.2	N^{\dagger}	20	V	<0.01 N [†] 20		
Cd	< 0.05	Cl	-	Cd	<0.1 Cl ^{††} <3		

^{*} The impurities are referred from [31].

^{*} The impurities marked by † are referred from [18] by assuming air confined into closed porosity.

^{*} The impurities marked by †† are referred from [34].

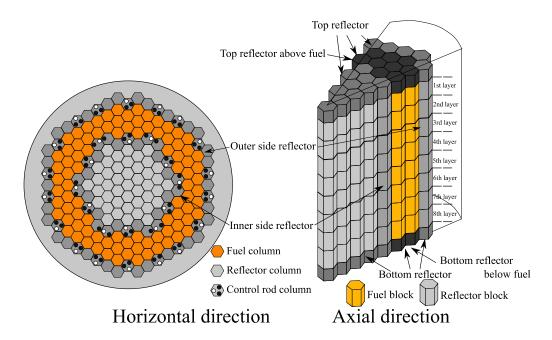


Fig.2.3 Core geometry of GTHTR300

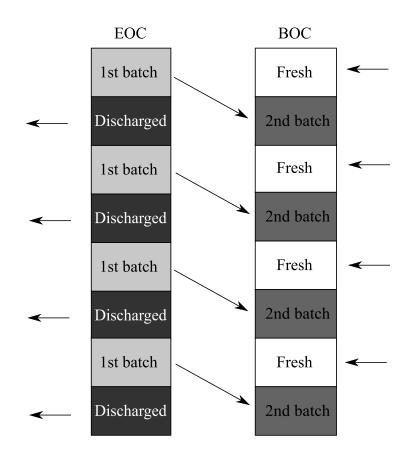


Fig.2.4 Reloading scheme of sandwich shuffling

3. 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の処分の法解釈に係る最終処分法及び 炉規法上の各廃棄物該当性並びに社会実装のための解決法

3.1 最終処分法の目的及び性格

高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物を処分する上では、最終処分法の下で処分されるか否かを判断する必要がある。それには、最終処分法の目的及び性格を理解しなければならない。最終処分法は、「この法律は、発電に関する原子力の適正な利用に資するため、発電用原子炉の運転に伴って生じた使用済燃料の再処理等を行った後に生ずる特定放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施させるために必要な措置等を講ずることにより、発電に関する原子力に係る環境の整備を図り、もって国民経済の健全な発展と国民生活の安定に寄与することを目的とする。」と規定する(最終処分法第1条)。

すなわち、最終処分法は、「特定放射性廃棄物の最終処分」についての環境整備を行うものであり、高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物は「特定放射性廃棄物」の要件を充足しない場合は炉規法の下の規制により処分されることとなる。また、最終処分法は、前述のとおり、現行の軽水炉サイクルによる使用済燃料の再処理等を行った後に生ずる地層処分をすべき特定放射性廃棄物の地層処分に関する法律と理解することができる(最終処分法第1条及び第2条第2項、最終処分法施行令第2条)。

なお、最終処分法は「国民経済の健全な発展」として再処理過程を含めた「経済性」についても言及している。この点、高温ガス炉の燃料構造及び再処理の前処理工程は複雑であり、高額になると思われるかもしれないが、発電効率について軽水炉の 34.5%³6)と比較すると、高温ガス炉では 45.8%¹²)であり、同じ燃焼度の燃料から取り出せる電力が 3 割程度大きく、結果として、発電量当たりの再処理費用は高温ガス炉のものが 3 割程度安価になる結果 ¹6)が得られており、再処理の経済性の観点からも「国民経済の健全な発展」に貢献できるものとなっている。

3.2 最終処分法上規定される特定放射性廃棄物の種類

最終処分法上の「特定放射性廃棄物」は「第一種特定放射性廃棄物」と「第二種特定放射性 廃棄物」とに分けられるが(最終処分法第2条第8項及び第9項、最終処分法施行令第3条)、 以下に示すように、前者が高レベル放射性廃棄物、後者が低レベル放射性廃棄物のうち半減期 が長く放射能濃度が高いTRU廃棄物(以下「高レベルTRU廃棄物」という。)を指している。

最終処分法制定当初は、高レベル放射性廃棄物を念頭に単に「特定放射性廃棄物」とだけ規定されていたが、その後、平成 19 年に、高レベル TRU 廃棄物も地層処分の対象に含めるべきであるとの趣旨で、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律の一部を改正する法律(以下「最終処分法一部改正法」という。)が制定され、新たに「第二種特定放射性廃棄物」が規定されるとともに、従来の「特定放射性廃棄物」が「第一種特定放射性廃棄物」にその名称が改められた。これらのことは、最終処分法一部改正法の審議過程においても明らかにされている 370。なお、TRU 廃棄物には、①高レベル TRU 廃棄物が「第二種特定放射性廃棄物」として最終処分法に定められたもののほか、②炉規法で定められる「第一種廃棄物」及び「第二種廃棄物」が存在するが、当該廃棄物(上記②の廃棄物)は最終処分法一部改正法の立法趣旨に鑑みれば「低

レベル放射性廃棄物(高レベル TRU 廃棄物以外の TRU 廃棄物を含む。以下同じ。)」を指すものとして整理することができ、その放射能濃度に応じて、トレンチ処分、ピット処分又は中深度処分とその処分法が大きく異なることに留意すべきである。

そして、最終処分法上、「第一種特定放射性廃棄物」及び「第二種特定放射性廃棄物」は、それぞれ以下のように定義されている。

まず、「第一種特定放射性廃棄物」とは、①「残存物を固型化した物」又は②「代替取得により取得した物」である(最終処分法第2条第8項)。

ここで「残存物」とは「使用済燃料の再処理に伴い使用済燃料から核燃料物質その他の有用物質を分離した後に残存する物」であり(最終処分法第2条第7項)、「代替取得」とは一言でいえば、使用済燃料再処理の海外委託に伴い発生し、当該委託国から我が国に返還されるべきTRU 廃棄物の代わりに、当該TRU 廃棄物とその放射線影響の度合いが等価的な量の高レベル放射性廃棄物とを交換して我が国に返還を受けることである。さらに、「使用済燃料の再処理」とは「使用済燃料から核燃料物質その他の有用物質を分離するために、使用済燃料を化学的方法により処理すること」であり(最終処分法第2条第5項)、「分離有用物質」とは「使用済燃料の再処理に伴い使用済燃料から分離された核燃料物質その他の有用物質」である(最終処分法第2条第6項)。

次に、「第二種特定放射性廃棄物」とは、「使用済燃料の再処理等(中略)に伴い使用済燃料、 分離有用物質又は残存物によって汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物(中略)で あって、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるものとして政令で定めるもの」であ る(最終処分法第2条第9項)。

この定義により、①「再処理工程において汚染されたものであること」、かつ、②「長期にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるものであること」の二つの条件を同時に満たした場合に初めて「第二種特定放射性廃棄物」となると理解できる。

そして、最終処分法施行令は、上記規定のうち、二つ目の要件である「長期間にわたり環境に 影響を及ぼすおそれのあるもの」を次のように定める(最終処分法施行令第3条)。

(第二種特定放射性廃棄物)

第三条 法第二条第九項の政令で定めるものは、次に掲げる物とする。

- 一 次に掲げる物を固型化し、又は容器に封入した物
 - イ 発電用原子炉の炉心に装てんされ、発電の用に供された金属であって、使用済燃料の 再処理に伴って使用済燃料とともにせん断されたもの
 - ロ イに掲げる金属を収納した容器に充てんされた水及び当該水のろ過に用いられたろ過 材
 - ハ 使用済燃料の再処理に用いられたりん酸トリブチル溶液(よう素及びその化合物の除去が行われていないものに限る。)の精製に用いられた炭酸ナトリウム溶液
 - 二 使用済燃料の再処理に伴って再処理施設から排出される空気に含まれるよう素及びそ の化合物の吸着に用いられた金属
- 二 前号に掲げる物のほか、使用済燃料の再処理等に伴い使用済燃料、分離有用物質又は残 存物によって汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物であって、次の表の上欄

に掲げる放射性物質についての放射能濃度がそれぞれ同表の下欄に掲げる放射能濃度を 超えるもの

炭素十四	八十七テラベクレル毎トン
塩素三十六	九十六ギガベクレル毎トン
テクネチウム九十九	ー・一テラベクレル毎トン
よう素百二十九	六・七ギガベクレル毎トン
アルファ線を放出する放射性物質	八・三ギガベクレル毎トン

3.3 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の最終処分法上の特定放射性廃棄物該当性

上記 3.2 では、最終処分法上の「第一種特定放射性廃棄物」と「第二種特定放射性廃棄物」の定義から各廃棄物の法令上の要件を確認した。

高温ガス炉使用済燃料再処理時に発生する高温ガス炉特有の廃棄物としては、2.2 で述べたとおり、①軽水炉のチャンネルボックス廃棄物に相当する黒鉛廃棄物と②ハル・エンドピースに相当する SiC 残渣廃棄物とがあり、本節では、これらの廃棄物が「特定放射性廃棄物」に該当するかを確認する。ただし、「第一種特定放射性廃棄物」とは高レベル放射性廃棄物である 37 ところ、黒鉛廃棄物及び SiC 残渣廃棄物はいずれも高レベル放射性廃棄物ではないので、実際には「第二種特定放射性廃棄物」該当性の確認で足りる。

(1) 黒鉛廃棄物

黒鉛廃棄物とは、前記 2.2 のとおり、軽水炉のチャンネルボックス廃棄物に相当する燃料棒を引き抜いた後の黒鉛ブロックの廃棄物であり、黒鉛ブロック自体は再処理工程(分離工程以降)によって汚染されることがない。

したがって、黒鉛廃棄物は、「特定放射性廃棄物」がその要件として求める「使用済燃料の再処理」に伴うものといえず、よって、特定放射性廃棄物とはいえない。ゆえに、黒鉛廃棄物については最終処分法の適用の必要はなく、炉規法上で検討され、処分されるべきことになる。

以上のことは、再処理前に解体され、炉規法の下で処分される BWR のチャンネルボックス 38 と同様の取扱いといえる。なお、黒鉛廃棄物の放射能濃度の評価結果について補足的に最終処分法施行令による制限値を比較してこれを Table $^{3.1}$ に示した。そのところ、同表の 16 Ti 及び 16 Ti いずれも、炭素 14 、塩素 36 、テクネチウム 99 、よう素 129 及び $^{\alpha}$ 核種のいずれの放射性物質においても、その放射能濃度が第二種特定放射性廃棄物の基準と比べて低いことが認められた。よって、黒鉛廃棄物が、放射能濃度の観点からも最終処分法上の第二種特定放射性廃棄物にすら当たらないことがデータ上からも読み取れる。

Table 3.1 Radioactivity in graphite waste and legal lower limit for 2nd class designated radioactive waste in the Designated Radioactive Waste Final Disposal Act (Bq/t)

	IG-11	IG-110	Lower limit
¹⁴ C	2.44E+10	2.44E+10	8.70E+13
$^{36}\mathrm{Cl}$	-	2.96E+08	9.60E+10
$^{99}\mathrm{Tc}$	2.47E + 05	2.47E + 05	1.10E+12
$^{129}\mathbf{I}$	4.04E+02	4.04E+02	6.70E+09
α nuclides	1.43E+08	1.43E+08	8.30E+09

(2) SiC 残渣廃棄物

一方で、SiC 残渣廃棄物は、軽水炉におけるハル・エンドピースに相当するもので、2.2 において述べたとおり、再処理工程において直接的に使用済燃料を溶解した硝酸溶液により汚染された物(耐食性が高いために回収される固体廃棄物)である。

したがって、「使用済燃料による再処理」に伴っていることは充足しているから、「特定放射性廃棄物」に該当するかを検討する必要がある。ただし、黒鉛廃棄物同様、SiC 残渣廃棄物も明らかに高レベル放射性廃棄物ではないので、「第二種特定放射性廃棄物」該当性の判定で足りる。

SiC 残渣廃棄物に関し、上記 3.2 で示した「第二種特定放射性廃棄物」の要件(①「再処理工程において汚染されたものであること」、かつ、②「長期にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるものであること」)を検討する。まず、SiC 残渣廃棄物は再処理工程の結果生ずるものであることから、一つ目の条件は満たしているといえる。次に、二つ目の要件に関する最終処分法施行令第3条(上記 3.2 の斜体部分)によれば、同条の構成として次のことがいえる。すなわち、①同条第1号は、軽水炉における使用済燃料の再処理を想定して具体的な廃棄物を示しており、このうち、②同号イはハル・エンドピースを、③同号ロはそれに附随する廃液及びそのろ過材を、④同号ハは溶媒再生に用いられた炭酸ナトリウム溶液を、⑤同号ニはヨウ素吸着塔の廃棄物である廃銀吸着塔をそれぞれ指しているといえる。いずれにしても、これらは、再処理工程で汚染されたものであり、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあることが自明であるため、具体的な記載が示されていると考えられる。⑥もう一つの類型として、同条第2号には、第1号に含まれない第二種特定放射性廃棄物を定めるための放射能濃度の当該表の下欄に定める濃度を超える値として下限値が示されている。

上記①~⑥の6類型にSiC残渣廃棄物を当てはめると、現状の第3条の規定では同条第2号の濃度を超えるか否かで検討を行うほかないといえる。また、高温ガス炉を実用炉(商用炉)として社会的に実装・運用していく段階で、軽水炉サイクルにおけるハル・エンドピースとで異なる取扱いをすべき政策的・法的・技術的理由は見当たらない。

この問題の解決策は、同条第1号イにある。つまり、同号イの規定に「発電用原子炉の炉心

に装てんされ、発電の用に供された金属であって、使用済燃料の再処理に伴って使用済燃料とともにせん断されたもの」のうち、「金属」について着目すると、高温ガス炉に装塡される燃料は、黒鉛を中心としたセラミックス粒子から成り「金属」ではないから、現状の最終処分法施行令の解釈として、この規定をそのまま適用することはできない。しかし、「金属」の後に「、セラミックス等」を、「せん断」の後に「、破壊等」を加えることにより、「発電用原子炉の炉心に装てんされ、発電の用に供された金属、セラミックス等であって、使用済燃料の再処理に伴ってせん断、破壊等されたもの」とその規定の一部を改正することで解決は可能である。

以上のことから、SiC 残渣廃棄物については、第二種特定放射性廃棄物に該当するものとして処分できるようにするため、同号イの一部改正をもって対応することが一案として挙げられる。

4. 炉規法の目的及び性格

前記 3.1 のとおり、最終処分法の規定する要件を充足しない場合(最終処分法の守備範囲とならない場合)は、炉規法の規制の下で検討する必要がある。

炉規法は廃棄の事業に関する規制を定めているが(第 7 章)、その規定をみる前に炉規法の目的及び性格について簡単に振り返る。炉規法は、①原子力基本法に則し、核原料物質、核燃料物質及び原子炉(以下「原子炉等」という。)の利用の平和目的への限定、②原子炉等による災害発生の防止、③廃棄の事業を含めた各事業等への必要な規制及び④国際約束履行のための規制を行うことにより、「国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに安全保障〔への寄与〕」を目的とする、主に、国民の生命や健康を護るためにその危険を未然に防止し、又は除去するといった消極目的規制の性格を持つ法律である(炉規法第 1 条)。そして、次章で述べる「廃棄の事業」に関する規制に係る規定を設けることも、上記国民の生命、健康及び財産を保護するために必要な措置であり、この点において、前記 3.1 の最終処分法以上に国民保護の観点が強いものといえる。

5. 炉規法上規定される廃棄物の種類

前記 3.2 において言及したとおり、炉規法上の廃棄の事業については、平成 19 年の最終処分法一部改正法による炉規法の一部改正によって、現在の炉規法にいう「第一種廃棄物」及び「第二種廃棄物」の区分が生じている。第一種廃棄物と第二種廃棄物との区別は「第一種廃棄物以外のもの」が「第二種廃棄物」という整理である。

まず、第一種廃棄物について、炉規法は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物であつて、これらに含まれる政令で定める放射性物質についての放射能濃度が人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものとして当該放射性物質の種類ごとに政令で定める基準を超えるもの」と規定する(炉規法第51条の2第1項第1号)。以上のことから、①「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物であること」、かつ、②「一定の放射性物質についての放射能濃度が一定の基準を超えるものであること」の二つの要件を満たすものが炉規法上の第一種

廃棄物であることが分かる(ゆえに、最終処分法のように「使用済燃料の再処理」に伴うことはその要件とはされていない。)。そして、上記の二つ目の要件については、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令(以下「炉規法施行令」という。)第31条に規定されている。

(政令で定める放射性物質の種類等)

第三十一条 法第五十一条の二第一項第一号の政令で定める放射性物質は次の表の上欄に掲 げる放射性物質とし、同号の人の健康に重大な影響を及ぼすおそれがあるものとして政令 で定める基準は同欄に掲げる放射性物質の種類に応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる放射 能濃度とする。

炭素十四	ナペタベクレル毎トン
塩素三十六	ナテラベクレル毎トン
テクネチウム九十九	百テラベクレル毎トン
よう素百二十九	ーテラベクレル毎トン
アルファ線を放出する放射性物質	百ギガベクレル毎トン

よって、上記以外のもの、すなわち、上記の表の濃度を超えないものが第二種廃棄物である (炉規法第51条の2第1項第2号)。

なお、炉規法上の第二種廃棄物の埋設の方法については、核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則(以下「第二種廃棄物埋設事業規則」という。)第1条の2第3号から第5号までにおいて、その規定する放射性物質の放射能濃度に応じて、中深度処分、ピット処分及びトレンチ処分が規定されている。

6. 高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物のうち黒鉛廃棄物の 第一種廃棄物・第二種廃棄物該当性及びその処分方法

高温ガス炉使用済燃料再処理においては、黒鉛廃棄物と SiC 残渣廃棄物が高温ガス炉特有のものとなるが、①黒鉛廃棄物は最終処分法の定める「特定放射性廃棄物」の基本的な要件である「使用済燃料の再処理」に伴うものではないため、最終処分法の適用を受けず炉規法の規制を受けることを前記 3.3 (1) で、②SiC 残渣廃棄物は軽水炉サイクルにおけるハル・エンドピース同様の処理を行うべきであって、そのためには最終処分法施行令第 3 条第 1 号イを改正して、第二種特定放射性廃棄物として処分すべきであることを前記 3.3 (2) でそれぞれ明らかにした。

ここでは、最終処分法の適用を受けない黒鉛廃棄物に関し、現行法の解釈における炉規法上 の第一種廃棄物及び第二種廃棄物該当性を検討する。

(1) 第一種廃棄物·第二種廃棄物該当性

黒鉛廃棄物に関し、上記5章で示した「第一種廃棄物」の要件(①「核燃料物質又は核燃

料物質によって汚染された物であること」、かつ、②「一定の放射性物質についての放射能濃度が一定の基準を超えるものであること」)を検討する。まず、黒鉛廃棄物は、前記 2.2 のとおり、軽水炉のチャンネルボックス廃棄物に相当する燃料棒を引き抜いた後の黒鉛ブロックの廃棄物であり、その黒鉛ブロックは燃料棒により汚染されているから、一つ目の要件を満たしているといえる。次に、二つ目の要件に関する炉規法施行令第 31 条について、その放射能濃度の比較を Table 6.1 に示した。その結果、IG-11 及び IG-110 のいずれを見ても、炭素14、塩素36、テクネチウム99、よう素129 及びアルファ線を放出する放射性物質(以下「アルファ核種」という。)のいずれにおいても、その放射能濃度が第一種廃棄物の基準と比べて低い。

したがって、黒鉛廃棄物は、炉規法上の第一種廃棄物には当たらず、ゆえに、第二種廃棄物であるといえる。

Table 6.1 Radioactivity in graphite waste and legal lower limit for 1st class waste disposal in the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Bq/t)

	IG-11	IG-110	Lower limit
¹⁴ C	2.44E+10	2.44E+10	1.00E+16
³⁶ Cl	-	2.96E+08	1.00E+13
$^{99}{ m Tc}$	2.47E+05	2.47E+05	1.00E+14
$^{129}\mathrm{I}$	4.04E+02	4.04E+02	1.00E+12
α nuclides	1.43E+08	1.43E+08	1.00E+11

(2) 黒鉛廃棄物の処分方法

第二種廃棄物である黒鉛廃棄物は、第二種廃棄物埋設事業規則に基づきその処分方法が決められる。最後に黒鉛廃棄物の処分方法を補足的に検討する。

黒鉛廃棄物に関し、第二種廃棄物埋設事業規則に規定されるピット処分及びトレンチ処分の放射能濃度上限値に係る比較を Table 6.2 及び Table 6.3 に示す。

各表をみると、ピット処分では、炭素 14、コバルト 60、ニッケル 63、ストロンチウム 90、 テクネチウム 99、セシウム 137 及びアルファ核種のいずれにおいても、IG-11 及び IG-110 の放射能濃度のそれがピット処分のそれを下回っているため、ピット処分は行うことができ る。

しかし、トレンチ処分では、コバルト 60、ストロンチウム 90 及びセシウム 137 の放射 能濃度について、IG-11 及び IG-110 を比較すると、いずれも上限値を超過するため、トレンチ処分はできない。

したがって、ピット処分を行うことが妥当である。

Table 6.2 Radioactivity in graphite waste and legal upper limit for pit disposal as 2nd class waste disposal in the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Bq/t)

			Upper
	IG-11	IG-110	limit
14 C	2.44E+10	2.44E+10	1.00E+11
$^{60}\mathrm{Co}$	4.94E+11	1.23E+11	1.00E+15
$^{63}\mathrm{Ni}$	2.35E+10	2.83E+08	1.00E+13
$^{90}\mathrm{Sr}$	1.33E+09	1.33E+09	1.00E+13
⁹⁹ Tc	2.47E+05	2.47E + 05	1.00E+09
$^{137}\mathrm{Cs}$	1.74E+09	1.74E+09	1.00E+14
α nuclides	1.43E+08	1.43E+08	1.00E+10

Table 6.3 Radioactivity in graphite waste and legal upper limit for trench disposal as 2nd class waste disposal in the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Bq/t)

	IG-11	IG-110	Upper limit
$^{60}\mathrm{Co}$	4.94E+11	1.23E+11	1.00E+10
$^{90}\mathrm{Sr}$	1.33E+09	1.33E+09	1.00E+07
$^{137}\mathrm{Cs}$	1.74E+09	1.74E+09	1.00E+08

7. 結言

商用の高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物の特性を的確に整理した上で、その処分に対する 法解釈を示し、必要な場合に法改正案を示すことを目的として、高温ガス炉使用済燃料再処理 と軽水炉使用済燃料再処理を比較し、その廃棄物の処分法について検討した。処分法の検討に ついては、黒鉛廃棄物の放射化量及び表面汚染による放射能濃度を、高温ガス炉全炉心燃焼解 析に基づく、ORIGEN ライブラリの作成及び ORIGEN コードによる放射化解析及び燃焼解析 により評価した。その結果に基づき、現行法令に照らし合わせ、その適用性を検討した。主な 結論を以下に示す。

- ➤ 高温ガス炉の使用済燃料は前処理が異なるだけで、再処理の分離工程以降は軽水炉と同等である。
- ➤ 高温ガス炉使用済燃料再処理時の高温ガス炉特有の廃棄物としては、軽水炉の BWR チャンネルボックス廃棄物に相当する黒鉛廃棄物とハル・エンドピースに相当する SiC 残渣廃棄物がある。

- ➤ 黒鉛廃棄物と SiC 残渣廃棄物の処分に関しては、まず、最終処分法における第二種特定放射性廃棄物に該当するかの判断が重要であり、①黒鉛廃棄物に関しては、第二種特定放射性廃棄物に該当せず、炉規法の定めるところにより処分法が決定されることになる。一方で、②SiC 残渣廃棄物については、軽水炉サイクルにおけるハル・エンドピースとその取扱いを異とすべき理由はないことから、高温ガス炉の社会実装に向けて、最終処分法施行令第3条第1号イを改正する形で上記ハル・エンドピースと同様に最終処分法上の第二種特定放射性廃棄物の規定を適用すべきである。
- ➤ 黒鉛廃棄物には、塩素を含むハロゲンガスによる高純度化処理で塩素不純物の混入が懸念されるが、高純度黒鉛 IG-110 においても検出下限値以下であり、検出下限値の不純物濃度を想定しても、塩素 36 による放射能は問題にならない。
- ➤ 黒鉛廃棄物処分において、炭素 14 の放射能濃度は問題とならず、コバルト 60、ストロンチウム 90、セシウム 137 の放射能濃度により、トレンチ処分を行うことができず、ピット処分となる。
- ➤ 上記の結果は、IG-11 及び IG-110 のどちらを用いても変わらず、高温ガス炉再処理により 発生する廃棄物処分の現行法令の適用性の検討及び処分深度の観点からも IG-11 の純度で 十分である。

なお、本研究の中で、興味深いことに、最終処分法上の第二種特定放射性廃棄物と炉規法上の第一種廃棄物について、炉規法上の第一種廃棄物に係る放射性物質の放射能濃度が最終処分法上の第二種特定放射性廃棄物のそれよりも高い。このことは、最終処分法は前述の立法趣旨からも地層処分をすべき高レベル放射性廃棄物及び高レベル TRU 廃棄物を対象とし、炉規法上の第一種廃棄物は低レベル放射性廃棄物を対象としていることと矛盾しているようであり、その点は今後の研究を要するものである。

謝辞

分離・変換に関する廃棄物処分の法解釈の議論が本研究の契機となっている。著者らは本研究を実施する契機となり、廃棄物処分の法的準備の重要性を御教授いただいた原子力機構原子力科学研究部門原子力科学研究所原子力基礎工学研究センターの松村達郎氏、西原健司氏、森田圭介氏に深く感謝いたします。高温ガス炉使用済燃料再処理廃棄物に関する懸念を示し、再処理の専門家である新試験研究炉準備室長の峯尾英章氏には、本テーマを御提示いただいたことに深く感謝いたします。また、高温ガス炉黒鉛材料及び高温ガス炉再処理技術の専門家である高温ガス炉プロジェクト推進室の角田淳弥氏、東洋炭素株式会社殿、原子燃料工業株式会社殿については、本研究を実施する上で、貴重な情報提供を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) AESJ, "The Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Final Report of the AESJ Investigation Committee", Springer, (2014) 560p.
- 2) H. Ohashi, H. Sato, Y. Tachibana, et al., "Concept of an Inherently-safe High Temperature Gas-cooled Reactor," ICANSE 2011, pp.50-58, (2011).
- 3) Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, "Strategic Energy Plan", (2018).
 - URL:https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf, (accessed March 6, 2023).
- 4) 内閣官房他, "2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略", (2021). URL: https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf, (accessed May 6, 2023).
- 5) 内閣官房, "成長戦略実行計画", (2021).
 URL: https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/ap2021.pdf, (accessed May 6, 2023).
- 6) 内閣府, "統合イノベーション戦略 2021", (2021). URL: https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2021_honbun.pdf, (accessed May 6, 2023).
- 7) 國富 一彦他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の設計研究", 日本原子力学会和文論文誌, 1[4], pp.352-360, (2002).
- 8) 片西 昌司他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の安全設計方針", 日本原子力学会和文論文誌, 2[1], pp.55-67, (2003).
- 9) 片西 昌司他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)用高燃焼度燃料の成立 性評価(I)", 日本原子力学会和文論文誌, 1[4], pp.373-383, (2002).
- 10) 片西 昌司他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)用高燃焼度燃料の成立 性評価(II)",日本原子力学会和文論文誌,3[1],pp.67-75,(2004).
- 11) 中田 哲夫他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の核熱流動設計", 日本原子力学会和文論文誌, 2[4], pp.478-489, (2003).
- 12) 高田 昌二他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の発電系設計", 日本原子力学会和文論文誌, 1[4], pp.341-351, (2002).
- 13) 小杉山 真一他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)発電系設備の保守・ 点検の基本方針",日本原子力学会和文論文誌,2[3],pp.319-331,(2003).
- 14) 小杉山 真一他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)発電系設備の点検方 法・手順",日本原子力学会和文論文誌,2[4],pp.532-545,(2003).
- 15) 武井 正信他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)使用済燃料再処理", 日本原子力学会和文論文誌, 2[4], pp.490-499, (2003).
- 16) 武井 正信他, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の経済性評価", 日本原

- 子力学会和文論文誌, 5[2], pp.109-117, (2006).
- 17) D. Greneche, M. Masson, P. Brossard, "The Reprocessing Issue for HTR Fuels: An assessment of Its Interest and Its Feasibility," Proceedings of Global 2003, New Orleans (U.S.), Nov. 16-20, (2003).
- 18) 角田 淳弥他, "高温ガス炉燃料の再処理技術", 日本原子力学会和文論文誌, 2[4], pp.546-554, (2003).
- 19) K. Sawa, S. Yosimura, S. Shiozawa, et al. "Study on Storage and Reprocessing Concept of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) Fuel," IAEA-TECDOC-1043, p.177, (1998).
- 20) S. Sugikawa, M. Maeda, T. Tsujino, "Process for a Gasification of Graphite," United States Patent 4228141, (1980).
- 21) 沢 和弘他, "高温工学試験研究炉燃料の貯蔵及び再処理技術の検討", JAERI-Research 2001-034, (2001).
- 22) 原子燃料工業, 私信, (2021).
- 23) A. G. Croff, "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Material," Nucl. Technol., 62, pp.335-352, (1983).
- 24) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori, "A Monte Carlo Neutron/Photon Transport Code MVP 2," Trans. Am. Nucl. Soc., 95, pp.662-663, (2006).
- 25) 深谷 裕司他, "高温ガス炉設計のための核種生成消滅評価法の研究", JAEA-Research 2013-035, 84p, (2013).
- 26) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, et al. "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol., 48, pp.1-30, (2011).
- 27) A. J. Koning, E. Bauge, C. J. Dean, et al. "Status of the JEFF Nuclear Data Library," J. Korean Phys. Soc., 59 (2), pp.1057-1062, (2011).
- 28) Y. Nakajima, "JNDC WG on Activation Cross Section Data: JENDL Activation Cross Section File. Proc. the 1990 Symposium on Nuclear Data," JAERI-M 91-032, pp.43-57, (1991).
- 29) A. J. Koning, R. Forrest, M. Kellett, M. et al. "The JEFF-3.1 Nuclear Data Library. JEFF Report 21," Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, (2006).
- 30) D. Rochman and A. J. Koning, "TENDL-2011:TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library," URL:http://www.talys.eu/ (accessed May 6 2023).
- 31) J. J. Lee, T. K. Ghosh, S. K. Loyalka, "Comparison of NBG-18, NBG-17, IG-110 and IG-11 oxidation kinetics in air," J. Nucl. Mater., 500, pp.64-71, (2018).
- 32) 中田 哲夫, "高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の核設計(委託研究)", JAERI-Tech 2002-066, 51p.(2013).
- 33) Bradtec Decon Technologies, Ltd., "Graphite Decommissioning: Options for Graphite

- Treatment, Recycling, or Disposal, including a discussion of Safety-Related Issues," Electric Power Research Institute, 1013091, (2006).
- 34) 東洋炭素, 私信, (2021).
- 35) 植田 祥平他, "HTTR 出力上昇試験における燃料及び核分裂生成物挙動の検討, 2; 30MW までの結果", JAERI-Research 2003-025, 59p. (2003).
- 36) Power Generation Cost Analysis Working Group, "Report on Analysis of Generation Costs, Etc. for Subcommittee on Long-term Energy Supply-demand Outlook," Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. (2015).
- 37) 国会会議録検索システム, "第 166 回国会 衆議院 経済産業委員会 第 10 号 平成 19 年 5 月 9 日", (2007).
 - URL:https://kokkai.ndl.go.jp/simple/txt/116604080X01020070509/176, (accessed May 6, 2023).
- 38) 越智 英治, "低レベル廃棄物処理", テキスト「核燃料サイクル」7-2, 日本原子力学会再 処理・リサイクル部会 (2015).
 - URL:http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt_7-2.pdf, (accessed May 6, 2023).

This is a blank page.