濃縮度 5 wt% 超燃料の実現に関する課題

エルビアクレジット燃料の提案

山崎 正俊^{1,*}, 宇根崎 博信²

The Challenges for Realization of above 5 wt% Enrichment Fuel

Proposing Erbia Credit Super High Burnup Fuel

Masatoshi YAMASAKI^{1,*} and Hironobu UNESAKI²

¹Nuclear Fuel Industries, Ltd., 1-950 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0481, Japan

²Kyoto University Research Reactor Institute, 2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan

(Received June 8, 2009 and accepted in revised form April 21, 2010)

For the sake of more efficient operation of nuclear power plants and to reduce the number of spent nuclear fuel assemblies, increasing uranium enrichment is one of the rational options. However, current uranium enrichment for the whole fuel cycle infrastructure is limited to no greater than 5 wt% from the view point of criticality safety. In this review, three main topics are discussed: 1) the necessity of increasing the uranium enrichment above 5 wt%; 2) current status and challenges to go over 5 wt% enrichment; and 3) proposal of the “Erbia Credit Super High Burnup Fuel” as a measure to break the “5 wt% enrichment barrier.” The third topic is further elaborated on by discussing the introduction scenarios before concluding with a mention of the necessity of a best-mix analysis for this concept in the fuel cycle supply chain.

KEYWORDS: *Erbia credit, super high burnup, 5 wt% enrichment, criticality safety, fuel cycle infrastructure, supply chain*

I. 緒 言

原子力発電プラントのさらなる有効利用のため、運転サイクル長の長期化、原子炉定格出力の向上、燃料の取出燃焼度の増加などが検討されている。これらの実現のためには、核分裂性のウラン同位体であるウラン235の同位体濃度(以下、「濃縮度」と略す)を上昇させていくことが有効である。その際、原子炉から取り出される使用済燃料の発熱量抑制の観点からも、燃料の濃縮度を上昇させ燃料の高燃焼度化を図ることが必要である。高燃焼度化に向けた材料開発、炉心概念の検討は現在各方面で盛んに行われているが、燃料の濃縮度に関しては、近い将来現行の制限値である 5 wt% を超えることが予想される。

日本国内においても濃縮度 5 wt% を超えることによる燃料コストの低減効果は原子燃料の専門家の間では認識されている。しかしながら、日本国内においては濃縮、再転

換、成型加工、輸送、新燃料貯蔵プールなどすべての燃料サイクルインフラの濃縮度は 5 wt% 以下に制限されており、特に 5 wt% を超える燃料(以下、「濃縮度 5 wt% 超燃料」と称す)を扱う再転換および成型加工施設に対しては「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」の適用を受けるため、諸外国と比較してさらに大幅な設備変更・設備投資が必要になることが危惧されている。

このような現状を反映し、濃縮度 5 wt% 超燃料に関しては下記のような議論が巷間で繰り返されている。曰く、

- 長サイクルと高燃焼度を両立させるには、本当に濃縮度 5 wt% を超えることが必須か？
- 海外を含め、濃縮度 5 wt% を超える燃料は調達可能なのか？
- 濃縮度が 5 wt% を超えるからといってなんら課題はない、すなわち現行燃料と同様な対処が可能なのではないか？
- 逆に濃縮度 5 wt% 超燃料の実用化は現行の国内法のもとでは不可能なのではないか？

そこで本報では

1) 濃縮度向上の必要性：サイクル長、燃焼度と濃縮

¹ 原子燃料工業㈱ 熊取事業所技術開発部

² 京都大学原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門/京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻

* Corresponding author, E-mail: yamasaki@nfi.co.jp

度の相関

- 2) 濃縮度向上に関する現状と課題：国内外の規制とインフラの現状
- 3) 濃縮度向上の課題に対する方策：課題を克服するための新たなコンセプトの提案

について概説することにより、上記のような疑問に対し筆者なりの回答を示す。これにより、国内における濃縮度 5 wt% 超燃料導入に関する課題が正しく認識され、その導入に関する議論がより深まることを期待する。その結果、濃縮度 5 wt% 超燃料の導入が加速され、原子力発電プラントのさらなる有効利用および原子力エネルギーの安定かつ安価な供給に資することを本報の目的とする。

II. 濃縮度向上の必要性

始めに、燃料の濃縮度と炉心の運転サイクル長、燃料の取出燃焼度の関係を説明し、濃縮度向上による燃料サイクルコスト^{a)}の低減効果を示す。なお、本報では燃料運用に関する詳細な記述は割愛し、一般的な傾向の概説に留める。

1. 濃縮度と燃料サイクルコスト

国内 PWR 炉心を対象に燃料濃縮度と炉心の運転サイクル長および取出燃焼度等の相関を簡易ツールにて評価した。この簡易ツールは燃料バッチごとの反応度変化を線形モデルで近似し、炉心平均の反応度、取替バッチ数、サイクル長、取出燃焼度等を簡便に評価するものであり、原子燃料の仕様決定や燃料運用の検討に一般的に用いられている。評価結果を第 1 図に示す。このとき、新燃料取替体数は炉内の燃料の 1/3 に固定^{b)}した。第 1 図より、新燃料取替体数一定の場合、濃縮度が高くなるほど運転サイクル

第 1 図 濃縮度と運転サイクル長および取出燃焼度の相関
(国内 PWR にて 3 バッチ運転を仮定した評価例)

a) 単位エネルギーを発生させるのに要する燃料コスト(単位は ¥/kWh)。原料ウランの採鉱・転換・濃縮・再転換・加工・輸送・再処理費を含む。

b) 全集合体数/新燃料取替体数をバッチ数と呼ぶ。新燃料取替体数が 1/3 の場合は 3 バッチとなる。

長は伸長し、取出燃焼度も増加することがわかる。

次に、濃縮度と燃料サイクルコストの相関を第 2 図に示す。このとき、上記と同様に新燃料取替体数は炉内の燃料の 1/3 に固定した。また、濃縮度が増加することに伴う採鉱費、濃縮費等の増加は考慮しているが、冷却期間やリードタイムに伴う現在価値観算は行っていない。第 2 図より、濃縮度が増加するほど燃料サイクルコストは低減(=改善)することがわかる。

これらの図より、例えば現在検討が進められている燃焼度 70 GWd/t 以上の高燃焼度化を実現するためには、濃縮度は 5 wt% を超え、6~7 wt% 程度になると予想される。

海外でも同様の検討が実施されており、現行の既存炉心の条件下では取出燃焼度 65~70 GWd/t 程度が経済性の最適点であり、その場合は濃縮度は 5 wt% を超えるとの報告がなされている^{1,2)}。

III. 濃縮度に関する規制やインフラの現状と課題

次に、濃縮度 5 wt% 超の燃料が経済的に有望であるとして、そのような燃料を導入するに当たっての課題について検討する。主な観点は濃縮度に対する我が国固有の安全規制、国際間で共通の規制と、供給インフラの状況である。

1. 我が国固有の安全規制

我が国固有のウラン濃縮度に関する規制について、主に燃料のフロントエンドの状況を述べる。

(1) 全般

「原子力基本法」は日本の原子力に関する最も基本的な法律であり、第 2 条以下に原子力利用の基本方針、「原子力」・「原子炉」等の用語の定義、原子力委員会・原子力安全委員会の設置、原子力の開発機関、核燃料物質や原子炉の管理などが定められている。原子力基本法においてはウラン濃縮度についての記載は特にない。

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法

第 2 図 濃縮度と取出燃焼度および燃料サイクルコストの相関
(国内 PWR にて 3 バッチ運転を仮定した評価例)

律」(以下「原子炉等規制法」と略す)においては製錬, 加工, 原子炉の設置・運転等, 貯蔵, 再処理, 廃棄といった事業別の規定が中心をなしており, さらに核燃料物質ならびに国際規制物資の使用に関する規制等が記されている。ウランの濃縮度については, 第二条 5 項に「ウラン二三三, ウラン二三五のウラン二三八に対する比率が天然の混合率を超えるウラン」と示されているのみで, 5 wt% を制限とする記載は特にない。

(2) 加工に関する規則

加工に関する規制としては, 行政当局(一次審査側)が制定した規則と原子力安全委員会(二次審査側)が決定した安全審査指針とがある。以下それぞれにおけるウラン濃縮度に関する記載をまとめる。

(a) 「核燃料物質の加工の事業に関する規則」(以下「加工規則」と略す)

加工規則においては, 第七条の九の防護措置の規定において, ウラン濃縮度ごとに必要な措置が記載されている。これによると, ウラン濃縮度については 20 wt% 以上, 20 wt% 未満～10 wt% 以上, 10 wt% 未満～天然濃度を超えるものの三種に区分されており, 5 wt% を超えても 10 wt% 未満であれば取り扱いに差はない。

(b) 「加工施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する総理府令」(以下「技術基準規則」と略す)

加工施設における事故時対応設備については, 技術基準規則の第三条第 2 項に規定されている。これによれば, 臨界質量以上のウラン(ウラン 235 の濃縮度 5 wt% を超えるものに限る)またはプルトニウムを取り扱う核燃料加工施設は, 臨界警報設備の設置および臨界事故の発生を想定した適切な措置を講じなければならない, と規定されている。

(c) 「核燃料施設安全審査基本指針」(以下「基本指針」と称す)

基本指針は各種の核燃料施設(原子炉等規制法で指定された加工施設, 再処理施設, 使用施設等)に共通した安全審査上の基本的考え方を取りまとめたものである。基本指針においては, 濃縮度に関する制限は特に規定されていない。

(d) 「ウラン加工施設安全審査指針」(以下「加工指針」と略す)

加工指針は, 基本指針に準拠し, ウラン加工施設に対する安全審査上の指針を取りまとめたものである。加工指針においては濃縮度は 5 wt% 以下に限定されており, いかなる場合においても臨界に達しないよう管理することにより, 臨界事故に対する考慮は不要とされている。

(e) 「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」(以下「特定加工指針」と略す)

特定加工指針は, 1999 年 9 月 30 日に起こった(株) JCO の臨界事故を踏まえ, 基本指針に基づき, 濃縮度が比較的高い「特定の」ウラン加工施設に対する安全審査上の指針

を取りまとめたものである。ここでいう「特定」とは, 原子炉等規制法に基づく加工の事業の許可(変更の許可を含む)の申請に関わる加工施設であって, 濃縮度 5 wt% を超え 20 wt% 未満のウランを転換, 加工する施設を指している。

特定加工指針における臨界事故の考え方は「指針 3. 事故時条件」において, 「事故の発生の可能性を技術的観点から十分に検討し, 最悪の場合, 技術的にみて発生が想定される事故であって, 一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事故」の候補として, 「ウランによる臨界」を含んでいる点が前述の加工指針との相違である。さらに, 想定される事故について「臨界の検出及び未臨界にするための措置」について「十分に検討」し, 「一般公衆に対して最大の放射線被ばくを及ぼす事故を最大想定事故として設定し, 一般公衆の線量を計算し, 一般公衆に対し, 過度の放射線被ばくを及ぼさないよう離隔が確保されることを確認すること。」と規定している。

加えて「指針 12. 臨界事故に対する考慮」ではさらに明確に「万一の臨界事故を想定し, これに対する適切な対策が講じられていること。このため, (1)特定のウラン加工施設は, 臨界警報装置の設置その他の臨界事故の発生を想定した適切な措置(臨界及びその継続性の検知)が講じられる設計であること。(2)指針 3 で臨界事故の発生が想定される施設において臨界事故が発生したとしても, これを未臨界にするための措置が講じられる設計であること。」と規定している。

特定加工指針ではその「まえがき」にて「事業者の申請内容が本指針に適合しない場合があったとしても, それが技術的な改良, 進歩等を反映して, 本指針が満足される場合と同等の安全性を確保し得ると判断される場合, これを排除するものではない」と明記されている。しかしながら, この特定加工指針における臨界事故に関する規定が, 特に国内において濃縮度 5 wt% を超える際の非常に大きな物理的かつ心理的な障壁になっていると考えられる。

(3) 輸送に関する規制

核燃料物質の輸送に関わる安全規制については, 国際原子力機関(IAEA)が定めた「放射性物質安全輸送規則」(IAEA 輸送規則)があり, 我が国でもこれを都度取り入れて関係する規則等の改正が行われている。一例として「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」を参考文献として示す³⁾。

核燃料輸送物(以下「輸送物」と略す)は収納物の放射能限度および物質の制限に従い, かつそれぞれに対応した要件に適合するものとして, 主に A 型, B 型, C 型に分けられる。また, 原子炉等規制法では, A 型の中で, 輸送物の表面の放射線量が低く, 同時に収納物の放射エネルギーが少ない輸送物を特に L 型と呼んでおり, これは我が国独自の輸送区分名称である。輸送物は, 輸送中に温度変化や振動など外的な要因により破損しないことが要求される。

第1表 核物質の区分表

核物質	形 態	第1群	第2群	第3群 ^{c)}
プルトニウム ^{a)}	未照射 ^{b)}	2キログラム以上	500グラムを超え2キログラム未満	15グラムを超え500グラム以下
ウラン235	未照射 ^{b)} ウラン235の濃度が20%以上のウラン	5キログラム以上	1キログラムを超え5キログラム未満	15グラムを超え1キログラム以下
	未照射 ^{b)} ウラン235の濃度が10%以上20%未満のウラン	/	10キログラム以上	1キログラムを超え10キログラム未満
	未照射 ^{b)} ウラン235の濃度が天然ウランにおける混合率を超え10%未満のウラン	/	/	10キログラム以上
ウラン233	未照射 ^{b)}	2キログラム以上	500グラムを超え2キログラム未満	15グラムを超え500グラム以下
照射済燃料		/	劣化ウラン、天然ウラン、トリウム又は低濃縮燃料(核分裂性成分含有率10%未満) ^{d,e)}	/

^{a)} すべてのプルトニウム(プルトニウム238の同位体濃度が80%を超えるプルトニウムを除く。)

^{b)} 原子炉内で照射されていない核物質、または原子炉内で照射された核物質であつて遮蔽がない場合にこの核物質からの放射線量率が1メートル離れた地点で1時間当たり100ラド以下であるもの。

^{c)} 第3群に掲げる量未満のものおよび天然ウランは、管理についての慎重な慣行に従つて防護するものとする。

^{d)} 第2群についての防護の水準が望ましいが、いずれの国も、具体的な状況についての評価に基づき、これと異なる区分の防護の水準を指定することができる。

^{e)} 他の燃料であつて、当初の核分裂性成分含有量により、照射前に第1群又は第2群に分類されているものについては、遮蔽がない場合にその燃料からの放射線量率が1メートル離れた地点で1時間当たり100ラドを超える間は、防護の水準を1群下げることができる。

(「核物質の防護に関する条約」の「附属書II」を転載)

このように、輸送物の区分は収納物の放射能限度に依存するため、濃縮度について特に制限はないが、核物質防護のための必要な措置を講ずることが定められている。III-2-(1)項で述べるように、核物質防護の観点からすれば、濃縮度は10 wt%未満であれば5 wt%を超過しても同等の取扱いが可能である。なお、当然ながら臨界安全性を担保するための質量制限等は濃縮度に応じて必要である。

2. 国際間で共通の安全規制

(1) 核物質防護

核物質防護に関しては、「核物質防護に関する勧告」(1975年初版、1999年改訂4, INFCIRC/225)が国際原子力機関(IAEA)からガイドラインとして示されている。これを踏まえ、国際間の核物質輸送に関しては「核物質の防護に関する条約」(以下「核物質防護条約」と略す)が締結されている。ウラン濃縮度の区分について、核物質防護条約の附属書(II)を第1表に示すが、これは上記 IAEA の勧告と同様である。

III-1-(3)項「輸送に関する規則」で述べたとおり、核物質防護上は濃縮度10 wt%未満であれば5 wt%を超えても取扱いは同じであり、5 wt%以下と特段変更はない。

(2) 保障措置

「核兵器の不拡散に関する条約」(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons:NPT)では、核兵器保有国以外への核兵器の拡散を防止するとともに、原子力の平和的利用技術の軍事技術への転用を防止するため、非核

第2表 規制対象核物質とその有意量

	物 質	有 意 量
直接利用核物質	プルトニウム	8 kgPu
	ウラン233	8 kgU233
	ウラン(濃縮度20%以上)	25 kgU235
非直接利用核物質	ウラン(濃縮度20%未満、天然、劣化ウラン含む)	75 kg(または天然ウラン10 t、劣化ウラン20 t)
	トリウム	20 tTh

(“IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition”より抄訳)。

兵器保有国が国際原子力機関(IAEA)の保障措置を受諾する義務を規定している。保障措置の目的は、有意量^{c)}の核物質が核兵器その他の核爆発装置の製造のためまたは不明な目的のために転用されることを阻止することであり、ここでいう有意量とその探知時間^{d)}はそれぞれ第2表および第3表のように規定されている。核不拡散上は濃縮度20 wt%を境に有意量および探知時間などの取扱いが異なるが、それ以下であれば濃縮度5 wt%以下と超過で扱いに差はない。

(3) 二国間協定

我が国は米国を始め、英国、フランス、カナダ、オーストラリア、中国、欧州原子力共同体(ユーラトム)と二国間の原子力協定を締結している。このうち、日米間の二国間

^{c)} 関連する転換工程をすべて考慮しても核爆発の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量。

^{d)} 実際の転用があつてから IAEA の保障措置によってそれが探知されるまでの時間の最大値。

第3表 規制対象核物質とその探知時間

規制対象核物質	探知時間
高濃縮ウラン [*] 、プルトニウムまたは U233 金属	7～10日
高濃縮ウラン [*] 、プルトニウムまたはその混合酸化物を含有する未照射核物質	1～3 週間
高濃縮ウラン [*] 、プルトニウムまたは U233 を含む照射済み核物質	1～3 ヶ月
劣化ウラン、天然ウラン、低濃縮ウランまたはトリウム	3～12 ヶ月

^{*} U235 and/or U233 を20%以上含有するウラン。
 (“IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition”より抄訳)。

協定「原子力の平和的利用に関する協力のための日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定」におけるウラン235濃縮度についての記載は、「この協定にもとづいて受領された核物質等を貯蔵、管轄外移転、再処理・形状内容の変更または濃縮(20 wt%以上)する際には、両国政府の事前の合意を要する」および第6条で「ウランは、同位元素ウラン235の濃縮度が20パーセント未満である範囲で濃縮することができるものとし、また、両当事国政府が合意する場合には、同位元素ウラン235の濃縮度が20パーセント以上になるように濃縮することができる。」の箇所である。また、「付表 核物質の区分」として第1表と同様の表が添付されている。

以上より、濃縮度 10 wt%または 20 wt%で区別はあるものの、濃縮度 5 wt%で扱いに差違はない。他の二国間協定においても同様に濃縮度 5 wt%を境にして内容が異なるような制限の規定は特にない。

3. 燃料インフラの現状

国内においては濃縮、再転換、成型加工、輸送、新燃料貯蔵プールなどすべての燃料インフラは一部の使用許可施設を除き、すべて濃縮度 5 wt%以下で設計され、許認可を取得している。

一方、海外においては、すでに 5 wt%超の許認可を取得した施設、あるいは設計上は 5 wt%超に対応した施設がある。本節ではこれら海外燃料インフラにおける濃縮度 5 wt%超の現状について、特に米国の情勢を中心に述べる。

(1) 濃縮・再転換・成型加工施設

海外では原子カルネッサンスに伴う今後の原子燃料の需要増加を見据え、いくつかの濃縮工場の新増設による供給能力の向上が進んでいる。

このうち、USEC 社は遠心分離法による新型濃縮プラント American Centrifuge Plant (ACP) の濃縮度制限を 10 wt%として規制当局に申請し、すでに認可を取得している。ACP は2009年に操業開始し、2010年には全稼働の予定である。

URENCO 社や AREVA 社が米国内で操業するガス拡散濃縮工場では、現在濃縮度は 5 wt%以下に制限されているが、再許認可を取りさえすれば濃縮度増加は可能であ

る。また、現在両社とも濃縮度制限を 7 wt%まで上げた遠心分離法の新型工場の建設を検討しており、実現は市場の要求次第である。

この他、ロシア Yekaterinburg 社のガス拡散濃縮工場もすでに 5 wt%超の許可を得ている。

再転換・成型加工施設については、世界の商業加工施設のうちロシア TVEL 社の Elektrostal 工場のみが現時点で濃縮度 5 wt%超の許認可を取得している。

一方、AREVA 社と GNF-A 社に導入された新しい乾式転換工場などは、設計上は 5 wt%超に対応可能であるが、許認可は 5 wt%以下で取得されている。このような施設では、改めて許認可を取得し直すのみで特段の設備改造なしに濃縮度制限の緩和が可能である。

(2) 許認可の負荷

米国燃料事業者に対する筆者らの直接および間接の聞き取り調査によると、米国では濃縮度 5 wt%以下/超過で規制に特段の差はなく、規制当局から要求されるのは施設の安全性が保証されることを解析し、設計するだけであるとのことである。

当初、濃縮度 5 wt%を超える燃料については、設計評価に必要な核特性実測データおよび設計コードの信頼性確認データが十分でないとの指摘もあったが、これもすでに USEC 社などで 5 wt%超の制限が認可されている現状を鑑みれば、既存データにより対応できたと考えられる。ただ、燃焼度クレジットを含む燃焼燃料の臨界性については、燃焼計算の妥当性を示す必要があり、データの拡充など要求事項が増えることが予想される。濃縮工場や加工工場など未燃焼新燃料のみを扱う施設に対しては、米国では比較的認可が取りやすいといえよう。

(3) 輸 送

濃縮度 5 wt%超燃料が市場に流通していないため、商用の 5 wt%超燃料の輸送を目的として許認可を取得した輸送容器は現時点では存在していない。濃縮度 5 wt%超燃料のフロントエンド側の輸送については、①濃縮工場から再転換施設への UF₆ の輸送、②再転換施設から成型加工工場へのウラン燃料粉末の輸送(再転換施設と成型加工工場が同一敷地内にある場合を除く)、③成型加工工場から原子炉への燃料集合体の輸送、の3つの側面について再許認可が必要となる。

このうち、UF₆ は金属シリンダ内で結晶固体として輸送されるが、シリンダに亀裂損傷が生じると空気中の水蒸気と反応し放射性の高腐食性のガスとなり、しかも容易に飛散していく。このように UF₆ の物理的活性度が非常に高いことに起因して容器の健全性が厳しく要求されるため、再許認可のコストはかなり高くなることが予想される。

一方、水分の侵入が起こり得ないことを前提とすれば UF₆ の輸送容器は臨界上の余裕は比較的大きく、濃縮度が 5 wt%を超えても特に問題にはならない。輸送の規制に関してはすでに示したとおり、濃縮度 10 wt%以下であ

れば特段取扱いの差はないが、当然ながら反応度が增加することに対する臨界安全上の評価は必要である。

以上より、濃縮度 5 wt% 超燃料に対する輸送の課題は、臨界安全の観点よりむしろ、 UF_6 輸送シリンダ容器の健全性に関する再許認可に伴うコスト増にあると考えられる。

なお、使用済み燃料の輸送に関しては濃縮度増加よりも、高燃焼度化に伴う熱や放射線強度の増加が懸案となる。使用済み燃料においては燃焼による反応度低下を考慮すれば臨界安全上の制約は緩和されるため、本報ではこれ以上は論じないこととする。

4. 濃縮度に関する規制やインフラの現状のまとめ

以上より、濃縮度向上に関する国内外における規制の現状と、供給インフラの状況について下記にまとめる。

- 濃縮度が 5 wt% を超過する際、日本国内で規制上の取扱いが異なるのは再転換および加工施設のみである。その他の核物質防護や二国間協定などの規制上は、10あるいは 20 wt% 以下であれば 5 wt% を超過しても同等の扱いである。
- 輸送については、臨界安全の観点よりむしろ、 UF_6 輸送シリンダ容器の健全性に関する再許認可に伴うコスト増に課題があると考えられる。なお、使用済み燃料の輸送に関しては濃縮度増加による反応度増加より、高燃焼度化に伴う熱や放射線強度の増加が懸案となる。
- 特定加工指針の適用を受けると、万一の臨界事故を想定し、これに対する適切な対策を講じることが要求される。これには大幅な設備改造や設計変更が伴うことが想定され、多大な設備投資が必要となる可能性が高い。これが国内において濃縮度 5 wt% を超える際の非常に大きな物理的かつ心理的な障壁になっていると考えられる。
- 一方、濃縮度 5 wt% に対して規制上なんら制約のない米国ではすでに濃縮度 5 wt% を超過する申請を出している施設や設計上 5 wt% 超に対応している施設など、5 wt% を超えるインフラが整備され始めている。濃縮度 5 wt% 超燃料の供給自体は、市場のニーズ次第で比較的容易に実現可能であると考えられる。

IV. 濃縮度向上の課題に対する方策

第 III 章で述べたとおり、日本国内で濃縮度 5 wt% 超燃料を導入する際の課題は、特定加工指針の適用に伴う大幅な設備変更である。これに対し、これら課題を解決する、もしくは影響を軽減する有効な施策として、筆者らは『エルビアクレジット燃料』⁴⁾の概念を提唱している。以下、このエルビアクレジット燃料について述べる。

1. エルビアクレジットの概念

濃縮度 5 wt% を超える燃料について再転換後すべてのウラン燃料粉末に低濃度の中性子吸収材を混入し、濃縮度 5 wt% 以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保できれば、それ以降の輸送や成型加工施設における臨界安全に関する影響を解消あるいは軽減できるものと考えられる。中性子吸収材としてはエルビア： Er_2O_3 またはガドリニア： Gd_2O_3 などがあるが、このようにウラン燃料粉末全量に中性子吸収材を混入して反応度上のクレジットを得る概念のうち、特にエルビアを使用したものを「エルビアクレジット」と称している。

エルビアクレジットの適用により、現状とおりの設備設計のままで臨界安全性を担保することが可能となるため、大幅な設備変更・設備投資が不要となることが期待できる。さらに、エルビアクレジットを適用しない場合と比較して、単位輸送容器の輸送量、加工施設における加工量、貯蔵庫における貯蔵量などの取扱量を増加させることができるので、作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上を図ることができる。

今後、新規に輸送・加工・貯蔵施設を建造する際は既存設備の変更に伴うコストは生じないが、この場合でもエルビアクレジットを活用することにより臨界安全上の制限値を緩和し、取扱量の増加による効率の向上が期待できる。

反応度クレジットを得るために用いる中性子吸収材としてガドリニアを使用することも考えられるが、下記の観点より筆者らはガドリニアよりエルビアの方が好ましいと考えている。(第 3 図参照)

- ガドリニアをすべての燃料に混入した場合には、例

第 3 図 エルビア入り燃料とガドリニア入り燃料の燃焼に伴う集合体反応度変化の比較

え極微量(0.2 wt%程度)でも初期反応度を過度に抑制してしまい、初期の炉心反応度が低くなり過ぎる。

- ガドリニアの場合、燃焼に伴う反応度変化が非常に急峻となり、燃焼中の出力分布の平坦化が困難である。
- 一方、エルビアを燃料棒に微量(0.2 wt%程度)混入した場合は、初期反応度を過度に抑制することなく燃焼特性も緩やかになる。これは、エルビアはガドリニアに比べて中性子吸収断面積が小さく、燃焼中の反応度変化も緩やかであるためである。

2. 技術課題

エルビアは米国 Combustion Engineering (CE) 炉、ロシア Reaktory Bolshoi Moshchnosti Kanalnye (RBMK) 等で長サイクル用の中性子吸収材として1980年代後半から広く用いられており、海外では製造実績・照射実績ともに豊富である。原子力業界以外でも広く用いられている工業用原料であり、入手も容易である。

エルビアクレジット燃料の技術課題としては、非常に低濃度(>0.2 wt%)のエルビアを燃料全体に混入させるという観点から、エルビウムの核データの取得、エルビア入り燃料の物性データの取得およびエルビア入り燃料の製造性の確認などがある。これらの技術課題については筆者らによる『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発』(平成17～19年、革新的実用原子力技術開発費補助事業)⁵⁻⁷⁾およびその後の研究において検討中である。

3. 特定加工指針への対応

すでに第 III-1-(2)(e)で示したとおり、特定加工指針の指針12においては、臨界事故に対する考慮として、1) 臨界の検知装置の設置、2) 未臨界にするための措置、が必要とされている。このうち、1)は想定事故に選定されるか否かに関わらず適切な措置(臨界およびその継続性の検知)を採ることとされているのに対し、2)に関しては臨界事故が指針3に則って想定事故に選定された施設にのみ要求される。すなわち、そもそも臨界事故が最大想定事故でなければ臨界の検知装置の設置や周辺被ばく評価は不要であるが、過去に臨界事故が濃縮度 7 wt%程度で発生している事実⁸⁾を踏まえ、万が一の事態に備えて未臨界にするための措置が要求されている。

一方、同じくすでに述べたとおり、特定加工指針ではその「まえがき」にて「事業者の申請内容が本指針に適合しない場合があったとしても、それが技術的な改良、進歩等を反映して、本指針が満足される場合と同等の安全性を確保し得ると判断される場合、これを排除するものではない」と明記されている。

したがって、指針の「解説」にあるとおり「臨界事故の発生の可能性に関し、事故の評価を要しない程に低くする手段を予め講ずる」ことおよび「まえがき」にあるように

「技術的な改良、進歩等を反映して、本指針が満足される場合と同等の安全性を確保する」ことが示されれば、特定加工指針の要求に対して柔軟に対処することが可能となる。エルビアクレジットはまさにこの主旨に則って、特定加工指針に対する物理的かつ心理的負荷の低減を図ることを目的としている。このような判断に必要な十分な核データ、物性データを蓄積し、科学的かつ合理的なロジックを構築することが、エルビアクレジット燃料の開発における重要な課題である。

4. エルビアクレジットの効果

これまでの検討を踏まえ、エルビアクレジット燃料が導入された際に期待される燃料サイクルの効果に関し特にフロントエンド側について検討する。

濃縮度 5 wt%超のウラン燃料粉末を扱うに当たり、エルビア粉末は再転換後のウラン燃料粉末に混入するものであるため、濃縮工程にはなんら効果はないし影響もしない。すなわち、濃縮工程においてはエルビアクレジット以外の方策にて高濃縮度への対応が必要である。再転換施設についても少なくともエルビア混入工程までは設備改造などの高濃縮度への対応が必要となろう。

成型加工施設においては、前述のように特定加工指針の要求を軽減できれば、エルビアクレジットによる経済性効果は非常に大きい。また、特定加工指針の適用いかに関わらず、加工量や貯蔵量を増加させて効率向上できるメリットもある。特定加工指針が存在しない海外においては、むしろ後者のメリットの方が注目されている。

再転換から加工工場、加工工場から発電所などの再転換後の輸送においては、エルビアクレジットを用いることにより現有の輸送容器をそのまま使い、取扱量を増加させて輸送効率を向上できる可能性がある。

なお、エルビアクレジットは主にフロントエンドにおける臨界安全性の向上を目的としたものである。下記に示すように、エルビアの有無に関わらずもともと存在しているバックエンド側の課題を解決するものではないことを注記しておく。

- バックエンドにおける臨界安全性に関しては、現状多くの施設において安全側に未燃焼新燃料の状態を仮定している。が、今後は燃焼による反応度低下を燃焼度クレジットとして考慮する方向であり、その際は未燃焼時の初期濃縮度が 5 wt%を超過すること自体は問題ではなくなる。
- また、安全側に中性子吸収材が全く存在しない状態を仮定するのではなく、中性子吸収材による反応度低下を考慮し、燃料の寿命中の実質的な最大反応度で臨界安全性を担保する手法もガドリニア入り燃料では認められつつある。これはガドリニアクレジットと呼ばれており、同様の目的でエルビアクレジットも適用可能ではあるが、この場合はガドリニア入

り燃料のように特定の燃料棒のみにエルビアを混入させればよく、必ずしも燃料全体にエルビアを混入させる必要はない。

- バックエンドにおいてはむしろ、反応度よりも高燃焼度化に伴う崩壊熱や放射線量の増加の方が課題となる。エルビアクレジットはこれらに対して特に効果を有するものではない。

5. 供給シナリオ

エルビアクレジット燃料の供給シナリオについて、燃料粉末へのエルビア混入施設の観点から検討する。

供給シナリオの検討において、エルビアクレジット燃料の優位性を高めるための重要なポイントは燃料サイクルのできるだけ早い時点でエルビアを混入させることである。考え得るオプションとして、以下の3つがある。

オプション1：濃縮工場敷地内に再転換およびエルビア混入施設を新規に併設する。

オプション2：濃縮工場とは別にエルビア燃料専用の再転換およびエルビア混入施設を新規に建設する。

オプション3：現存の再転換工場にエルビア混入工程を追加する。

オプション1では濃縮後、同敷地内で再転換を行い、エルビアを混入する。この場合、UF₆の輸送が不要となり、かつ、濃縮再転換工場出荷後は現存の輸送容器で成型加工メーカに燃料粉末を輸送できる。第III-3-(3)で述べたとおり、UF₆シリンダの再許認可にはかなりのコストが見込まれるが、オプション1ではこの問題がなく、当濃縮再転換施設以降の設備改造や再許認可が最低限で済み、最も広くエルビアクレジットの恩恵に預かることができるオプションである。すでに海外のいくつかの濃縮工場では濃縮度5 wt%超の許認可を取得済みあるいは取得予定であり、これらの濃縮事業者と協力し、製品の差別化と商業機会の拡大を図ることがオプション1の実現シナリオである。

オプション2ではエルビア燃料専用再転換工場を新規に建設する。濃縮後、当専用再転換工場にUF₆を輸送し、再転換後エルビアを混入し、各加工施設に燃料粉末を輸送する。UF₆輸送の問題は残るものの、専用再転換工場出荷後は設備改造等が最低限で済む。しかしながら新規の工場設立は大きな初期投資と長いリードタイムが必要な高リスクの経営課題となる。このため、リスク分散とスケールメリット向上のために複数の加工工場向けに複数の濃縮工場からの燃料粉末を処理することが有効である。

オプション3では既存の再転換工場の濃縮度制限を向上させ、エルビアを混入させる工程を追加するものである。すでに設計上は5 wt%超に対応している施設では、比較的小さな投資でエルビア混入施設の実現が可能であると考えられる一方、燃料サイクルインフラにおけるエルビアクレジットの影響範囲は限定的なオプションである。

我が国においては、まずは青森県六ヶ所村に建設されている濃縮工場の濃縮度制限を5 wt%超に向上させ、同一敷地内に再転換施設を併設するオプション(オプション1)が有効である。この場合、特定加工指針の適用を受けるのは六ヶ所村工場構内のみに限定され、再転換後のウラン燃料粉末の輸送以降は、エルビアクレジットの適用により既存の国内インフラを最大限活用できることが期待できる。

一方、六ヶ所村濃縮工場のみでは国内需要をまかないきれないこと、および現在でも国内需要の大半を海外で再転換している現状を鑑みれば、濃縮度5 wt%超燃料に対する規制がさほど厳しくなく、すでに実現化しつつある海外施設にて再転換後エルビアを混入し、国内の燃料インフラに対してはエルビアクレジットによって設備改造を不要とするシナリオが現実的である。

このようにエルビアクレジットを活用し、国内外の濃縮・再転換・加工プロセスのベストミックスを検討しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図ることが重要であると考えられる。

V. 結 論

原子力発電所における使用済燃料の発生量抑制のため、燃料の濃縮度を5 wt%超に上昇させた高濃縮度燃料について、特にフロントエンド側に着目し、国内外の規制や海外の動向などについて述べた。また、濃縮度5 wt%超燃料実現のための有効な手段として、『エルビアクレジット燃料』を提案し、その概念と効果、供給シナリオなどについて検討した。

その結果、濃縮度が5 wt%を超過する際、日本国内で規制上の取扱いが異なるのは再転換および加工施設のみであり、核物質防護、輸送、核不拡散などの規制は、10 wt%以下であれば5 wt%を超過しても同等の扱いであることがわかった。

また、加工施設については、エルビアクレジットにより特定加工指針の要求を緩和することにより、既存の設備改造が不要となり生産性の向上による経済的メリットも期待できることがわかった。

さらに、エルビアクレジット燃料の供給オプションについては、国内外のベストミックスを目指しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図ることの重要性を指摘した。

エルビアクレジットを実用化するためには、エルビア入り燃料の核特性や物性データの蓄積を始め、未臨界性を担保するための必要十分なエルビア量算出方法の提示など、様々な技術課題がある。これらについては『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発』(平成17~19年、革新的実用原子力技術開発費補助事業)およびその後の研究により実施中であり、別報にて随時報告していく所存である。

本報の執筆に当たっては、神田啓治京都大学名誉教授、中込良廣京都大学名誉教授が主催される『エネルギー政策研究会』の皆様から大変貴重なご意見を頂いた。ここに心より感謝申し上げます。

また、エルビアクレジットのコンセプト、技術開発の観点からは、竹田敏一大阪大学教授(現 福井大学国際原子力工学研究所所長)を始め革新的実用原子力技術開発費補助事業『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発』の共同実施者諸氏から多大なご助言を頂いた。ここに心より感謝申し上げます。

— 参考文献 —

- 1) J. R. Secker, O. Ozer, K. Ivanov *et al.*, “Optimum discharge burnup and cycle length for PWRs,” *Proc. Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003)*, Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003 (2003). [CD-ROM].
- 2) R. Gregg, A. Worrall, “Effect of highly enriched/highly burnt UO_2 fuels on nuclear design parameters and economics,” *Proc. Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003)*, Hilton Head Island, South Carolina, USA, Oct. 5-8, 2003 (2003). [CD-ROM].
- 3) 経済産業省, 「IAEA 放射性物質安全輸送規則2005年版の取り入れ等に伴う『核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則』等の一部改正について」(平成18年).
- 4) A. Yamamoto, H. Unesaki, M. Mori *et al.*, “Development of Erbia-bearing super high burnup fuel,” *Proc. Int. Cong. on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'06)*, Reno, Nevada, USA, Jun. 4-8, 2006 (2006). [CD-ROM].
- 5) 原子燃料工業㈱他, 『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発(平成17年度)』, 革新的実用原子力技術開発費補助事業成果報告書概要版 (2006).
- 6) 原子燃料工業㈱他, 『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発(平成18年度)』, 革新的実用原子力技術開発費補助事業成果報告書概要版 (2007).
- 7) 原子燃料工業㈱他, 『エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発(平成19年度)』, 革新的実用原子力技術開発費補助事業成果報告書概要版 (2008).
- 8) N. Watanabe, H. Tamaki, *Review and Compilation of Criticality Accidents in Nuclear Fuel Processing Facilities Outside of Japan*, JAERI-Review 2000-006, JAERI (2000).