

JAERI-Tech
2002-089



JP0250569



高温ガス炉ガスタービン発電システム
(GTHTR300) の燃料サイクルコストの検討
(受託研究)

2002年11月

武井 正信・片西 昌司・中田 哲夫・小田 耕史*
泉谷 徹*・國富 一彦

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 滋城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 滋城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の燃料サイクルコストの検討
(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
武井 正信・片西 昌司・中田 哲夫・小田 耕史*・泉谷 徹*・國富 一彦

(2002年10月1日受理)

高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の基本設計において、プラント全体の経済性向上を図るには、発電コストに大きな比重を占めている燃料費（燃料サイクルコスト）の削減が不可欠である。そこで、GTHTR300を対象に、燃料サイクルコストの評価を行った。高温ガス炉燃料製造について、商用規模での製造実績がないことから、GTHTR300×4基の燃料製造を想定し、年間加工量約7.7ton-Uの燃料製造プラントの概略設計を行い、燃料製造コストを評価した。次に、GTHTR300の平衡サイクルを想定して、燃料サイクルコストの算出を行った。燃料サイクルのステージとしてウラン採鉱・製錬、転換、濃縮、再転換・成型加工、中間貯蔵、再処理、廃棄物処理・処分を考慮した。検討の結果、GTHTR300の燃料サイクルコストはウラン採鉱・製錬から中間貯蔵までを対象とすると約1.07円/kWh、バックエンドコストが軽水炉とほぼ同等と仮定し、再処理、廃棄物処理・処分まで含めると約1.31円/kWhとなる見通しが得られた。また、燃料の仕様が変更された場合として、濃縮度10~20wt%、被覆粒子の種類数1~4種類、被覆粒子第1層の厚さ30μmの変動、第2層~第4層の厚さ10μmの変動について検討したが、燃料製造コストへの影響は無視できるとの評価を得た。

本報告書は、日本原子力研究所が文部科学省からの受託により実施している電源特会「核熱利用システム技術開発」の「高温発電システム」の研究成果である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607

* 原子燃料工業株式会社

Study on the Fuel Cycle Cost of Gas Turbine High Temperature Reactor (GTHTR300)
(Contract Research)

Masanobu TAKEI, Shoji KATANISHI, Tetsuo NAKATA,
Takefumi ODA*, Toru IZUMIYA* and Kazuhiko KUNITOMI

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 2002)

In the basic design of gas turbine high temperature reactor (GTHTR300), reduction of the fuel cycle cost has a large benefit of improving overall plant economy. Then, fuel cycle cost was evaluated for GTHTR300. First, of fuel fabrication for high-temperature gas cooled reactor, since there was no actual experience with a commercial scale, a preliminary design for a fuel fabrication plant with annual processing of 7.7 ton-U sufficient for four GTHTR300 was performed, and fuel fabrication cost was evaluated. Second, fuel cycle cost was evaluated based on the equilibrium cycle of GTHTR300. The factors which were considered in this cost evaluation include uranium price, conversion, enrichment, fabrication, storage of spent fuel, reprocessing, and waste disposal. The fuel cycle cost of GTHTR300 was estimated at about 1.07 yen/kWh. If the back-end cost of reprocessing and waste disposal is included and assumed to be nearly equivalent to LWR, the fuel cycle cost of GTHTR300 was estimated to be about 1.31 yen/kWh. Furthermore, the effects on fuel fabrication cost by such of fuel specification parameters as enrichment, the number of fuel types, and the layer thickness were considered. Even if the enrichment varies from 10 to 20 %, the number of fuel types change from 1 to 4, the 1st layer thickness of fuel changes by 30 μm , or the 2nd layer to the 4th layer thickness of fuel changes by 10 μm , the impact on fuel fabrication cost was evaluated to be negligible.

Keywords: HTGR, Fuel Fabrication Cost, Fuel Cycle Cost

This study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

* Nuclear Fuel Industries, Ltd.

目 次

1.	はじめに	1
2.	前提条件	2
3.	燃料製造コストの評価	9
3.1	燃料製造工程の概要	9
3.2	燃料製造プラントの概略設計	11
3.3	燃料製造コストの検討	16
4.	燃料サイクルコストの評価	33
4.1	燃料サイクルコストの計算方法	33
4.2	燃料サイクルコストの検討	35
5.	今後の検討課題	44
6.	まとめ	46
	謝辞	47
	参考文献	47
	付録1 燃料製造設備の臨界安全性について	48
	付録2 燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価の算出	58

Contents

1.	Introduction	1
2.	Precondition	2
3.	Evaluation of Fuel Fabrication Cost	9
3.1	Outline of Fuel Fabrication Process	9
3.2	Outline Design of Fuel Fabrication Plant	11
3.3	Estimation of Fuel Fabrication Cost	16
4.	Evaluation of Fuel Cycle Cost	33
4.1	Calculation Method of Fuel Cycle Cost	33
4.2	Estimation of Fuel Cycle Cost	35
5.	Future Examination Subject	44
6.	Summary	46
	Acknowledgements	47
	Reference	47
	Appendix 1 Nuclear Criticality Safety Evaluation of Fuel Fabrication Equipment	48
	Appendix 2 Calculation of Unit Price used by Fuel Cycle Cost Evaluation	58

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所(原研)では、平成13年度から、高温ガス炉の熱利用研究の一環として、高温ガス炉を用いた電気出力300MW程度のガスタービン発電システム(Gas Turbine High Temperature Reactor 300: GTHTR300)の設計を行っている。これは、原研の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)における設計・製作、運転・試験の経験を踏まえて、高温ガス炉固有の安全上の特徴を十分に活かし、安全機能の簡素化等を図る等の設計の工夫により、経済性の優れたプラントとすることを目指している⁽¹⁾。また、原子力発電コストにおいて大きな比重を占める燃料サイクルコスト⁽²⁾の削減を図っている。

高温ガス炉の開発は、イギリス、ドイツを中心とするヨーロッパ及びアメリカで始まり、3基の実験炉が1960年代～1980年代に、2基の発電用原型炉が1980年代に運転されている。実験炉はDragon炉(OECD、20MWe、1964～1976年)、AVR(ドイツ、46MWe/15MWe、1966～1988年)、及びPeach Bottom-1炉(アメリカ、115MWe/40MWe、1966～1974年)である。原型炉は、Fort St. Vrain炉(アメリカ、842MWe/330MWe、1974～1989年)、及びTHTR-300(ドイツ、750MWe/300MWe、1983～1989年)である。これらの高温ガス炉はいずれも高濃縮ウラン、トリウムの混合燃料を用いている。

一方、濃縮ウラン燃料を用いた高温ガス炉として、2基の試験研究炉が運転中である。HTTR(日本、30MWe、1998年臨界、濃縮度3.4～9.9%)、及びHTR-10(中国、10MWe、2000年臨界、濃縮度18%)である。

しかしながら、高温ガス炉燃料製造について実用炉への供給を前提とした低濃縮ウランを用いた商用規模での製造実績はなく、製造プロセスも軽水炉燃料より複雑であり、化学的な要素を多く含むことから、燃料製造コストは軽水炉燃料よりも高価になると予想される。そこで、GTHTR300×4基の燃料製造を想定した燃料製造プラントの概略設計を行い、燃料製造コストの評価を行った。

次に、GTHTR300を対象に、燃料サイクルコストの評価を行った。燃料サイクルコストは、想定した発電プラントの発電量と、原子炉に装荷される燃料の燃料サイクルにおいて発生する費用から求められ、単位発電量あたりのコスト(円/kWh)で表される。本検討では、燃料製造のための原料手当から、使用済燃料の中間貯蔵までを対象として、燃料サイクルコストの評価を行った。バックエンドの燃料サイクルコストの検討は今後の課題である。

なお、本研究は、文部科学省から原研への委託により実施している電源特会「核熱利用システム技術開発」の「高温発電システム」の内容に関するものである。

2. 前提条件

燃料サイクルコストは、想定した発電プラントの発電量と、原子炉に装荷される燃料の燃料サイクルにおける各ステージ(ウラン採鉱・製錬、転換、濃縮、再転換・成形加工、中間貯蔵、再処理、廃棄物処理・処分)において発生する費用から求められ、単位発電量あたりのコスト(円/kWh)で表される。

燃料サイクルコストは対象とする原子炉の諸元、燃料体仕様、選択する燃料サイクルの方式によって異なった値となる。例えば、原子炉の諸元及び燃料体の仕様は、燃料の加工方法に影響を与え、その結果として成形加工における発生費用は違ったものとなる。また、使用済燃料の処理方法についても再処理した場合と、直接処分した場合とで、発生費用が異なるものとなる。

(1)燃料サイクル

軽水炉の燃料サイクルを例に、燃料サイクル全体と各要素を Fig. 1 に示す。フロントエンドは、ウラン採鉱・製錬、転換、濃縮、再転換・成形加工の 4 つの要素から成る。バックエンドについては、大別すると 2 つのオプションが考えられる。第 1 は使用済燃料を再処理し回収したウランとプルトニウムをリサイクルするものであり、第 2 は使用済燃料の再処理は行わず直接処分するものである。我が国では、資源の有効利用の観点からリサイクルオプションを推進している。

高温ガス炉の燃料サイクルも、軽水炉の燃料サイクルと基本的に同様であるが、高温ガス炉燃料は PyC 及び SiC で被覆した微小な被覆燃料粒子から構成されており、これが核分裂生成物及び燃料そのものを閉じ込める「容器」となっているため、高温ガス炉燃料は技術的には長期貯蔵後の再処理または直接処分に適した燃料であるといえる。

本検討においては、再処理オプションを想定し燃料サイクルコストを評価した。高温ガス炉使用済燃料の再処理技術の特徴は、黒鉛及び被覆燃料粒子を取り扱うことから前処理工程が必要になることであり、研究開発が行われてきた⁽³⁾。前処理工程は、燃料要素(燃料コンパクトまたはペブル球)から被覆燃料粒子を取出す工程と、被覆燃料粒子から燃料(UO₂)を取出す工程に大別できる。なお、前処理工程以降については、軽水炉使用済燃料の再処理に用いられている Purex 法が適用できる。従って、高温ガス炉使用済燃料の前処理工程を含めた再処理単価は、軽水炉よりも高価格になると考えられる。

燃料サイクルコスト評価に用いるコスト単価であるが、フロントエンドにおいて、ウラン採鉱・製錬、転換、濃縮については、軽水炉ベースの単価を用いることとする。再転換・成形加工については、高温ガス炉燃料製造のプロセスが軽水炉燃料と大きく異なることから、燃料製造コスト評価を行うこととした。バックエンドにおいて、中間貯蔵については、軽水炉ベースの単価をもとに、高温ガス炉と軽水炉の使用済燃料の特性の違いを考慮し、コスト単価を概略評価することとした。再処理については、低濃縮ウランを用いた高温ガス炉燃料について商用規模での使用済燃料再処理の実績がないことから、軽水炉ベースの単価を参考として用いることとする。

(2)原子炉及び燃料諸元

検討の対象とする原子炉は、原研で検討中の GTHTR300 とした。炉の主要諸元を Table 1 に、燃料の主要諸元を HTTR 燃料と比較して Table 2 に示す。

GTHTR300 の燃料体は、六角柱状の黒鉛ブロックに燃料要素である燃料コンパクトを収納したブロック型の燃料体という点において HTTR 燃料の燃料体と同じである。異なる点は、黒鉛ブロックへの燃料要素の収納と燃料要素の黒鉛ブロックの固定法である。Fig. 2 に示すように、HTTR 燃料の燃料体では、燃料要素として黒鉛スリーブに燃料コンパクトを封入した燃料棒を黒鉛ブロックに収納するのに対し、GTHTR300 の燃料体は、黒鉛スリーブを用いずに燃料コンパクトを黒鉛ブロックに収納する方式である。そのため、黒鉛スリーブに代わるものとして、燃料コンパクトの外周に厚さ 1mm の黒鉛層を有する。また、燃料要素の黒鉛ブロックへの固定は、HTTR 燃料の燃料体の場合、黒鉛スリーブに加工された支持リブと呼ばれる突起物で行われるのに対し、GTHTR300 の燃料体では黒鉛心棒と黒鉛スペーサで保持される。

被覆燃料粒子は、 UO_2 の燃料核に 1 層から 4 層までの被覆を施した 4 重被覆粒子である。各被覆層の材質は、HTTR 燃料と同じであり、第 1 層：低密度炭素、第 2 層及び第 4 層：高密度炭素、第 3 層：SiC となっている。GTHTR300 の燃料では、高燃焼度化に対応するため、燃料核を小さくするとともに、プレナムに相当する第 1 層、及び被覆層の主要な強度部材となる第 3 層の厚さを大きくしたもの用いている。

(3)原子力安全委員会安全審査指針

日本国内で GTHTR300 の燃料を製造する場合、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」(平成 12 年 9 月 25 日、原子力安全委員会決定)に適合する必要がある。「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」は、従来の「ウラン加工施設安全審査指針」(昭和 55 年 12 月 22 日、原子力安全委員会決定)が、濃縮度 5%以下のウランを転換、加工する施設を対象としていたのに対し、平成 11 年 9 月 30 日に起こった JC0 での臨界事故を踏まえ、濃縮度が比較的高いウランを転換、加工する施設を対象としてとりまとめられたものである。指針の主要な項目を以下に示す。

- ① 指針の適用対象は、「濃縮度 5%を超える、20%未満のウランを転換、加工する施設」である。
- ② 「指針 10. 単一ユニットの臨界安全」において、「(1) ウランを収納する設備・機器のうち、その寸法又は容積を制限し得るものについては、その寸法又は容積について核的に安全な制限値が設定されていること。この場合、溶液状のウランを取扱う設備・機器については、全濃度安全形状を基本とする」とされている。また、「(2) 上記(1)の規定を適用することが困難な場合には、取扱うウラン自体の質量や溶液中の濃度等について核的に安全な制限値が設定されていること。この場合、誤操作等を考慮しても工程中のウランが上記の制限値を超えないよう、十分な対策が講じられていること。」とされている。
- ③ 「指針 12. 臨界事故に対する考慮」においては、「(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。」とされている。さらに、「(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。」とされている。

現在、高温ガス炉燃料を商用規模で製造できる唯一のメーカーである原子燃料工業(株)東海事業所のHTR燃料製造施設は、核燃料物質の使用の許可を受けた使用施設であり加工施設ではないが、HTTR燃料の濃縮度は3.4~9.9%であることから、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」に準拠するため、以下の対策をとっている⁽⁴⁾。

- ・臨界事故を想定除外できるための対策を検討した結果、重要な湿式設備についてはインターロックを設置することとした。また、臨界及びその継続性の検知が可能なように、臨界モニターを設置することとした。
- ・湿式工程へのウラン投入量を制限するために、カセット式粉末投入器を追設するとともに、ガンマ線センサー及び液面センサーを設け、インターロックの多重化、多様化を図ることとした。

GTHTR300燃料の濃縮度は14%であり、GTHTR300燃料の燃料製造プラントも、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」に適合する必要がある。本検討では、後述するように、燃料製造プラントの検討において、燃料製造設備の臨界安全性を形状制限により担保することとした。また、インターロック等の臨界事故を想定除外できるための対策、臨界及びその継続性の検知のための臨界モニターの設置、を考慮して製造プラントの概略設計を行った。

Table 1 GTHTR300の炉心諸元

項目	値	単位
炉心熱出力	600	MWt
熱効率	46	%
燃焼期間	4	年
稼働率	90	%以上
燃焼期間/バッチ	730	日
バッチ数	2	バッチ
装荷ウラン量	7.7	ton
初期濃縮度	14	%
燃料体数	720	体
燃料カラム数	90	カラム
ブロック段数	8	段
燃料体形式	一体型燃料	—
ブロック平径	40.5	cm
ブロック間ギャップ	0.1	cm
ブロック高さ	100	cm
燃料実効長	95	cm
燃料ピン数	57	

Table 2 GTHTR300燃料とHTTR燃料の基本仕様

項目	仕様	
	HTTR初装荷燃料	GTHTR300
燃料核		
直径	600 ± 55 μm	550 μm
密度	10.63 ± 0.26 g/cc	10.8 g/cc
被覆燃料粒子		
被覆層厚さ		
第1層	60 ± 12 μm	140 μm
第2層	30 ± 6 μm	25 μm
第3層	25 + 12 - 0 μm	40 μm
第4層	45 ± 6 μm	25 μm
被覆層密度		
第1層	1.10 ± 0.10 g/cc	1.15 g/cc
第2層	1.85 + 0.15 - 0.10 g/cc	1.85 g/cc
第3層	≥ 3.19 g/cc	3.20 g/cc
第4層	1.85 + 0.15 - 0.10 g/cc	1.85 g/cc
燃料コンパクト		
寸法		
外径	26.0 ± 0.1 mm	24.0 mm
内径	10.0 ± 0.1 mm	9.0 mm
長さ	39.0 ± 0.5 mm	約80 mm
マトリックス密度	1.70 ± 0.05 g/cc	1.70 g/cc
充填率	30 ± 3 vol%	約33 vol%

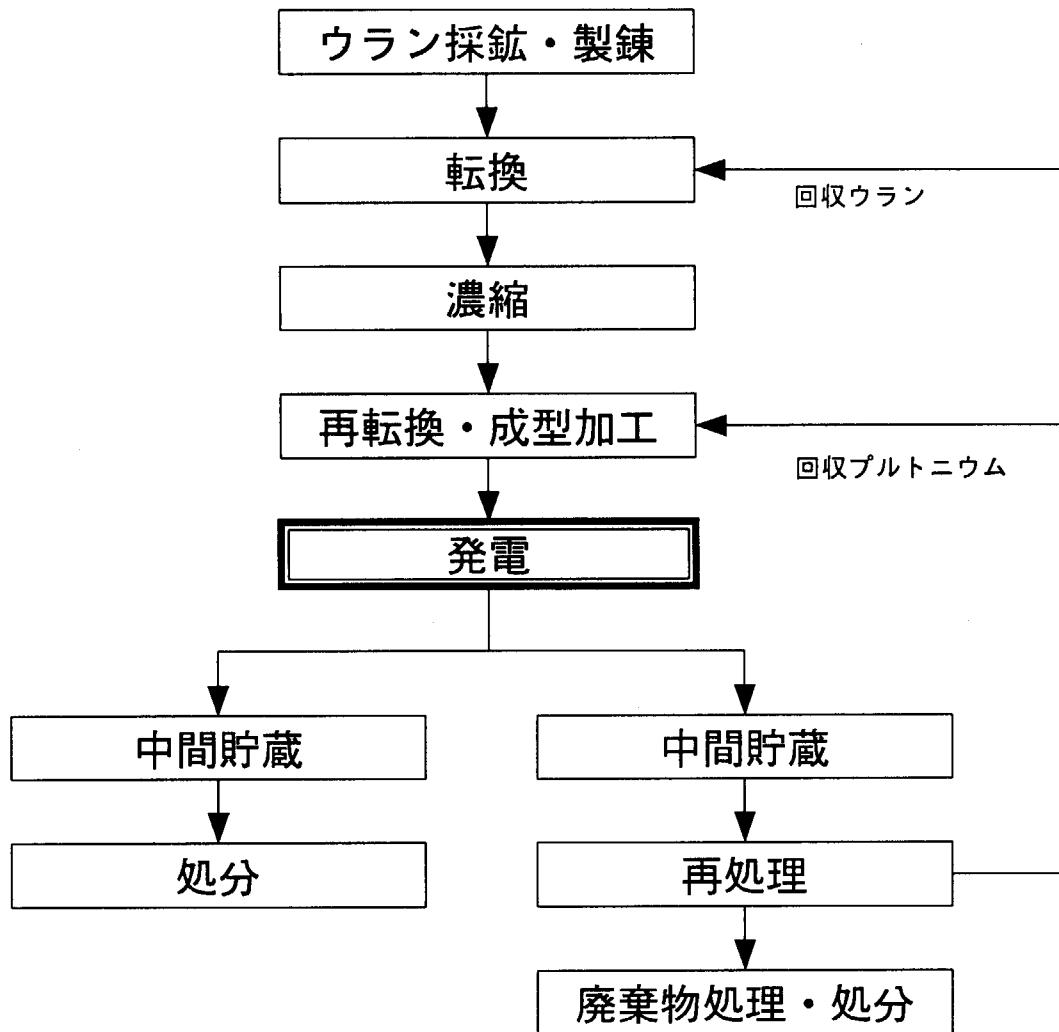
直接処分オプション再処理オプション

Fig. 1 燃料サイクル

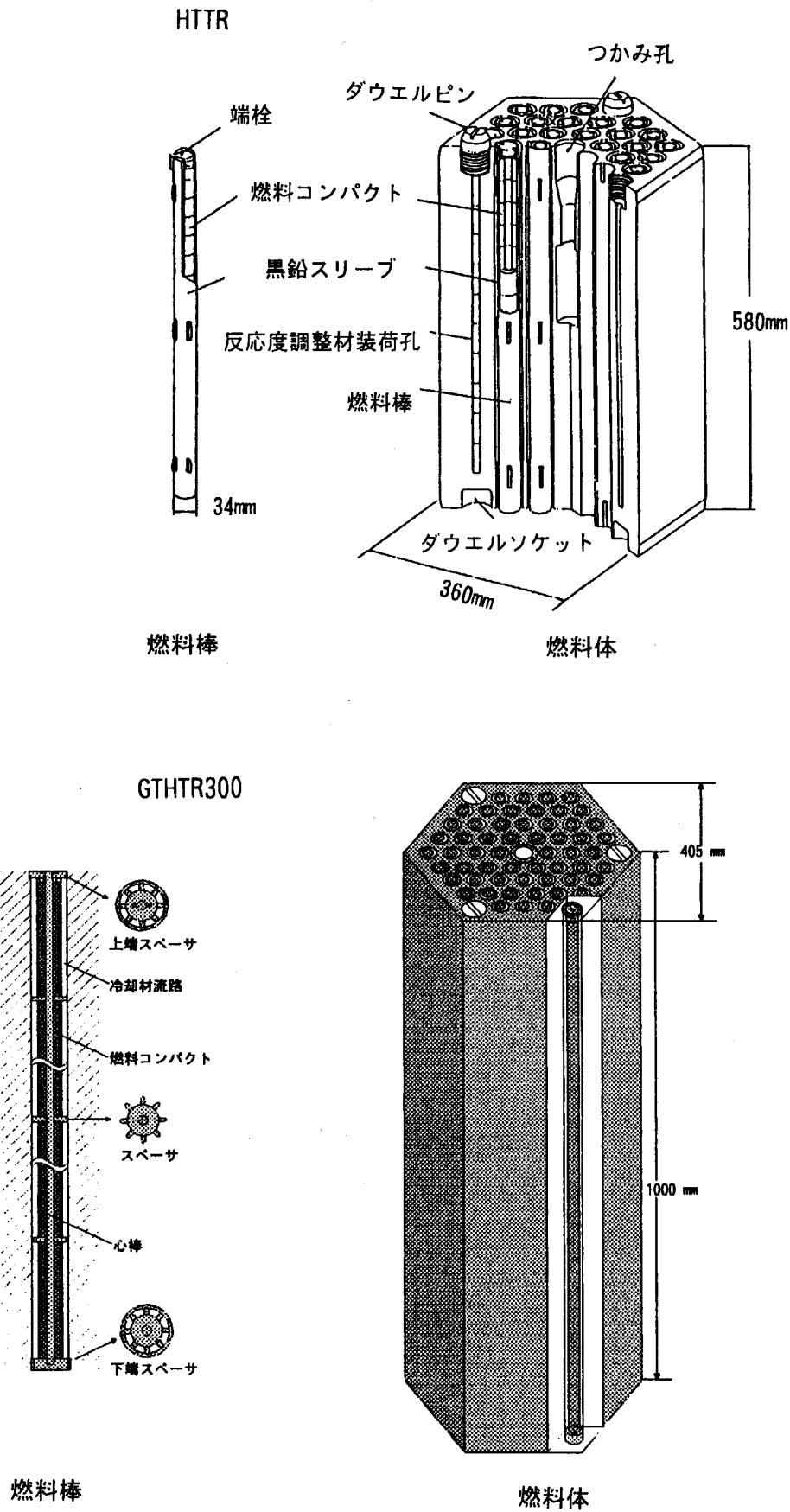


Fig. 2 燃料体の構造

3. 燃料製造コストの評価

高温ガス炉の燃料サイクルも、軽水炉の燃料サイクルと基本的に同様である。しかしながら、高温ガス炉燃料の製造プロセスは、軽水炉燃料よりも複雑であり、化学的な要素を多く含むことから、燃料製造コストは軽水炉燃料よりも大きくなると予想される。そこで、GTHTR300×4基の燃料製造を想定した燃料製造プラントの概略設計を行い、燃料製造コストの評価を行った。

3.1 燃料製造工程の概要

GTHTR300 燃料の製造工程及び製造法は、既に製造実績のある HTTR 燃料の製造工程、製造法を参考にすることができる。HTTR 燃料の製造工程を Fig. 3 に示すが、燃料核製造、被覆燃料粒子製造、燃料コンパクト製造、燃料体組立、の 4 工程に大きく分けられる。GTHTR300 燃料の製造を想定した燃料製造プラントの各製造工程の概略を以下に示す。

(1)燃料核工程

燃料核の製造工程を Fig. 4 に示す。

①ADU 粒子生成

ADU 粒子生成工程は、 U_3O_8 粉末から ADU 粒子を生成する工程であり、 UO_2 の燃料核を製造するための最初の工程である。最初に U_3O_8 粉末を硝酸に溶解した硝酸ウラニルに所定の添加剤を加え、調整液として調整する。次に、この調整液を振動ノズルでアンモニア水中に滴下させる。滴下された液滴は、アンモニア水中でゲル化され球状の ADU 粒子となる。この反応を用いた ADU 粒子の製造方法は外部ゲル化法と呼ばれる。また、生成される ADU 粒子の直径は、滴下される液滴の直径に依存し、液滴の直径は、滴下を行う振動ノズルの振動数により調整される。最終的に、滴下によって生成した ADU 粒子を純水で洗浄した後に乾燥させて ADU 粒子とする。

②焙焼

焙焼工程は、ADU 粒子生成工程で製造した ADU 粒子を空気中、数百度で熱処理することによって添加剤等の除去を行う工程である。その処理は、焙焼炉により行われる。ADU 粒子は、焙焼処理によって UO_3 粒子となる。

③焼結

焼結工程は、 UO_3 粒子を水素雰囲気中、数百度の温度で還元し、その後千数百度の温度で焼結することによって UO_2 粒子を製造する工程である。その処理は、焼結炉により行われる。

④焼結粒子の選別

選別工程では、焼結によって得られた UO_2 粒子の真球度、粒径の選別が行われる。選別を終えた UO_2 粒子は、検査を経て燃料核工程における最終製品である燃料核となる。

(2)被覆工程

燃料核を被覆し被覆燃料粒子とする工程を Fig. 5 に示す。

(1)被覆

被覆工程は、燃料核に4層の被覆層を蒸着させる工程であり、流動床により行われる。被覆層の蒸着は、流動床に投入された燃料核を流動させた後に各層の蒸着に合わせた千数百度の温度条件下において、蒸着させる層の原料となる被覆ガスを導入して燃料核に被覆層を蒸着させる。被覆各層の被覆ガス原料は、次のとおりである。

被覆層	被覆ガス原料
第1層(低密度炭素層)	アセチレン
第2層(高密度炭素層)	プロピレン
第3層(SiC層)	メチルトリクロロシラン、水素
第4層(高密度炭素層)	プロピレン

(2)被覆燃料粒子選別

被覆燃料粒子の選別工程では、UO₂粒子と同様に真球度選別と粒径選別が行われる。選別を終えた被覆燃料粒子は、検査を経て被覆工程における最終製品である被覆燃料粒子となる。

(3)燃料コンパクト工程

燃料コンパクトの製造工程をFig. 6に示す。

(1)黒鉛マトリックス材調整

燃料コンパクトの黒鉛マトリックス材の基となる調整黒鉛粉末を天然黒鉛粉末(天然に産出する黒鉛鉱石を精錬したもの)、人造黒鉛粉末(石油ベースの主原料を黒鉛化処理したもの)及びフェノール樹脂から調整する工程である。調整黒鉛粉末は、天然黒鉛粉末16wt%、人造黒鉛粉末64wt%、フェノール樹脂20wt%の割合で調整する。調整黒鉛粉末の調整は、混練機及び粉碎機で行われる。

(2)オーバーコート

オーバーコート工程は、燃料コンパクトのプレス成型の前処理として、被覆燃料粒子に調整黒鉛粉末を付着させたオーバーコート粒子を製造する工程である。オーバーコート粒子は、被覆燃料粒子を転がっている状態に保ち、エチルアルコールの噴霧と調整黒鉛粉末の散布を同時にを行い、エチルアルコールで湿った被覆燃料粒子表面に調整黒鉛粉末を付着させることで製造される。オーバーコート処理直後の粒子は、エチルアルコールの噴霧によって湿っているため、真空中で乾燥処理を行う。その後、粒径選別と、被覆燃料粒子を複数含む異型のオーバート粒子の除去を行う。

(3)プレス成形

HTTR燃料製造における燃料コンパクトのプレス成型は、燃料コンパクトの仕様で定められたウラン量、マトリックス密度となるように燃料コンパクト1個当たりに必要なオーバーコート粒子の秤量値を定め、オーバーコート粒子の秤量を行うことから始まる。次に、秤量されたオーバーコート粒子は、成型前にバインダーの流動性を高めるために余熱処理を行った後、温間プレス機に投入され、燃料コンパクトに成型される。GTHTR300の燃料コンパクトはFig. 7に示すように外周に黒鉛層を有する点がHTTR燃料と異なる。

このため、燃料コンパクトに黒鉛層を施すために、HTTR 燃料とは異なった方法で製造を行う必要がある。

燃料コンパクトの外周に黒鉛層を施す方法として、オーバーコート粒子の他に黒鉛の粒子又は調整黒鉛粉末を別に準備しておき、プレス成型時に燃料コンパクトの外周部となる部分に黒鉛粒子又は調整黒鉛粉末を投入して成型を行う方法が考えられる。Fig. 8 に示すように、プレス機への粒子投入ノズルを二重構造とし、黒鉛粒子又は調整黒鉛粉末をプレス金型の外周部に投入し、燃料粒子を含むオーバーコート粒子をその内側に投入することによって、外周に黒鉛層を有する燃料コンパクトを成型する方法である。この方法は、HTTR 燃料の製造法とほぼ同じであることから、技術的な開発要素もほとんどなくコストの面においても影響がないと考えられる。

④予備焼成、焼成

予備焼成、焼成の工程は、プレス成形された燃料コンパクトの黒鉛マトリックス材に含まれているバインダーの除去と炭化を行う工程である。予備焼成は、窒素ガス雰囲気中、数百度で行われ、その後、焼成炉により、真空下で千数百度の条件により焼成が行われる。

(4)燃料体組立工程

燃料体の組立は、燃料コンパクトと燃料体の構成部材である黒鉛ブロック、黒鉛部材から燃料体を組み立てる工程である。

3.2 燃料製造プラントの概略設計

GTHTTR300×4 基の燃料製造を想定した燃料製造プラントの概略設計を行った。

(1)燃料製造能力

GTHTTR300 の燃料装荷量、及び燃料交換頻度は次のとおりである。

燃料交換頻度	0.5 傷心/2 年
燃料装荷体数	720 体 (90 カラム × 8 段)
ウランインベントリ	7.7 ton-U

よって、炉 1 基のために製造すべき燃料体数は、180 体/年であり、ここでは炉 4 基を対象とした燃料製造プラントを想定しているため、燃料製造能力は 720 体/年となる。また、ウラン量ベースでは、製造ロス、不合格品によるロスを考慮し、製造歩留を 90% と仮定すると、約 8.5ton-U/年となる。

また、1 日当たりの燃料製造量を求めるために、燃料製造プラントの稼動日数等を次のように想定した。

プラント稼動日数	240 日/年 (年間休日 125 日程度)
燃料製造工程数	4 (燃料核、被覆、コンパクト成形、燃料体組立)
工程間のタイムラグ	10 日 (検査等の期間)
設備メンテナンス	20 日/年 (工程毎)

燃料製造プラントにおいて 1 年あたり燃料製造が可能な日数は、稼動日数である 240 日か

ら設備のメンテナンス期間である 20 日と工程間のタイムラグ 10 日を引いた 210 日となる。燃料製造プラントにおける 1 日あたりの製造量は、1 年当たりの製造量である燃料体 720 体、ウラン量で約 8.5 ton-U と年間に製造が可能である日数 210 日から、燃料製造プラントにおける 1 日あたりの処理量を約 40kg-U、燃料体数約 4 体とした。

(2) 製造設備数

想定している GTHTR300 燃料の燃料製造プロセスと燃料製造設備の構成は、HTTR 燃料の燃料製造設備とほぼ同じである。しかしながら、HTTR 燃料の製造設備を基に約 40kg-U/日の製造量を確保するための必要設備数を見積もると、各燃料製造設備の必要数が非常に多くなり現実的ではない。そこで、各燃料製造設備の臨界安全性を形状制限により担保することとし、燃料製造設備 1 バッチ当たりの処理量を増加させた設備を検討し、設備数を見積もることとした。

GTHTR300 燃料の濃縮度は 14% であることから、燃料製造プラントは、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」の適用対象となる。臨界安全性については、「指針 10. 単一ユニットの臨界安全」において、「(1) ウランを収納する設備・機器のうち、その寸法又は容積を制限し得るものについては、その寸法又は容積について核的に安全な制限値が設定されていること。この場合、溶液状のウランを取扱う設備・機器については、全濃度安全形状を基本とする」とされている。燃料製造プロセスのうち、ADU 粒子生成工程が湿式(溶液状のウランを取扱う)工程であり、これ以降は燃料を固体状で扱う乾式工程である。本検討では、臨界安全性評価の簡略化のため、全ての設備について全濃度評価を行うこととした。評価の内容を付録 1 に示す。

燃料製造設備の中には、製造プロセスにおいて適切な反応状態を得るために、処理を行う容器の大きさに対して処理量を制限することが必要な設備がある。その制限を最も受けるのが流動床である。その要因として、安定した品質の被覆層の製造には、被覆を行う燃料核の流動状態を安定させることが重要であり、処理容器である反応管の寸法と投入される燃料核の量が流動状態に与える影響が大きいことが挙げられる。そこで、各燃料製造設備における処理量は、品質管理及び工程管理の観点から、流動床の処理量を基に検討した。

① 流動床

臨界安全ハンドブック第 2 版⁽⁵⁾によると、水反射体付き均質 $\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の最小推定臨界下限値は、濃縮度 20% の円柱モデルにおいて直径 17.4cm である。原燃工における被覆の最大処理実績は、約 4.4kg-U (燃料核で約 5kg) であり、この時に使用した反応管の直径は、約 20cm である。このことから、直径 17.4cm の反応管においても同量の処理が可能であると考えられる。また、実際の燃料製造では、量産を目的とした GTHTR300 燃料製造の技術開発が行われることを考慮すると、流動床での処理量を約 10kg-U まで増加させることは可能であると考えられる。よって、流動床の処理バッチサイズを約 10kg-U とし、約 40kg-U/日の製造量を担保するために流動床の数を 4 基とする。

② ADU 粒子生成装置

ADU 粒子生成装置は、溶解槽、調整槽、原液貯槽、沈殿槽及び乾燥槽で構成される。

溶解槽、調整槽及び原液貯槽では、約 10kg-U のウランを数十リットルの硝酸ウラニル溶液として取り扱う。また、それぞれでの槽での硝酸ウラニルの取り扱いは、流動床のようにその製造プロセスによって、装置サイズの制限を受けることもない。モンテカルロ計算コード KENO-Va(SCALE4 システム)を用いて、 $k_{\text{eff}} + 3\sigma < 0.95$ を未臨界制限とした評価において、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 均質で $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 及び H_2O をパラメータとした計算の結果、直径(Φ)30cm の円筒体系で未臨界であった。

沈殿槽は、硝酸ウラニルに添加剤を加えた調整液を滴下ノズルによって滴下を行い、ADU 粒子を生成させる。 $\text{U}-\text{H}_2\text{O}$ 均質の臨界計算の結果、Φ20cm の円筒体系で未臨界であった。よって、沈殿槽はΦ20cm の円筒形状の槽とし、沈殿槽の処理バッチサイズを約 10kg-U とする。この槽を用いて 10kg-U 以上の製造も可能であるが、滴下を行う滴下ノズルを配置できる数量が槽の直径に制限されるため、約 10kg-U の製造が妥当である。また、乾燥槽も同様に、Φ20cm の円筒体系で未臨界である。

以上のことから、ADU 粒子生成装置を構成する全ての槽は、それぞれの槽が 1 槽で約 10kg-U の処理を行うことが可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な ADU 粒子生成装置は 4 設備である。

(3)焙焼炉

$\text{UO}_3-\text{H}_2\text{O}$ 均質の臨界計算の結果、幅 30cm、高さ 11cm の無限平板体系で未臨界である。そこで、焙焼ボードの大きさを幅(W)30cm、奥行き(L)30cm、高さ(H)2cm とする。ADU 粒子の焙焼は、ADU 粒子をほぼ一層に並べて処理を行う必要があることから、1 ボードあたり約 120g-U の ADU 粒子を投入できるため、約 10kg-U のウランでは約 85 枚の焙焼ボードが必要になる。そこで、焙焼炉の加熱室における焙焼ボードの配置を 5 段、17 列とし、加熱室の長さを 500cm とした。この設計により焙焼炉は、1 設備あたり約 10kg-U の処理が可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な焙焼炉の数は 4 炉である。

(4)焼結炉

焼結炉は、処理時間が約 1.5 日であることから、連続焼結炉を選択して平均的な処理量が 1 日当たり約 40kg-U となるように設計した。 $\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 均質の臨界計算の結果、W30cm、H9cm の無限平板体系で未臨界である。そこで、焼結を行う焼結ボードの大きさを W30cm、L30cm、H2cm とした。この焼結ボードには、1 ボードあたり約 270g-U の UO_3 粒子を投入できるため、約 40kg-U のウランでは約 150 枚の焼結ボードが必要になる。そこで、焼結炉の加熱室における焼結ボードの配置を 4 段、38 列とし、加熱室の長さを 1150cm とした。この設計により焼結炉は、1 設備あたり約 40kg-U の処理が可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な焙焼炉の数は 1 炉である。

(5)オーバーコート装置

$\text{UO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 均質の臨界計算の結果、Φ40cm、H17cm の円筒体系で未臨界である。そこで、オーバーコート装置は、Φ40cm とした。1 設備あたり約 10kg-U の被覆粒子の処理が可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要なオーバーコート装置は 4 設備である。

(6)燃料コンパクト成型装置

約 10kg-U のウランは、燃料コンパクト約 700 個に相当する。燃料コンパクトの成型に約 10 分必要であることから、プレス機の成型ステーションを 12 式とし、コンパクトの成型処理時間が約 50 秒/個となるプレス機を設計した。この設計により、1 設備当たり約 10kg-U/日の可能である。なお、 UO_2-H_2O 均質の臨界計算の結果、W20cm、H58cm の無限平板体系で未臨界であることに基づき、成型ステーションの設計を行った。この設計により燃料コンパクト成型装置は、1 設備あたり約 10kg-U の処理が可能であり、約 40kg U/日の製造量を担保するのに必要な燃料コンパクト成型装置は 4 設備である。

(7)予備焼成炉

予備焼成炉は、処理時間が約 3.5 日であることから、1 設備あたりの処理量を燃料コンパクト数で約 2800 個(約 40kg-U)とし、平均的な処理量が 1 日当たり約 10kg U となるように設計した。 UO_2-H_2O 均質の臨界計算の結果、W20cm の無限平板体系で未臨界である。そこで、予備焼成を行う黒鉛ボードの大きさを W20cm、L20cm、H10cm とした。この黒鉛ボードには、1 ボードあたり約 40 個の燃料コンパクトを投入できるため、燃料コンパクト約 2800 個の処理には約 72 枚の黒鉛ボードが必要になる。そこで、予備焼成炉の加熱室における黒鉛ボードの配置を 6 段、12 列とし、加熱室の長さを 250cm とした。この設計により予備焼成炉は、1 設備あたり約 40kg-U の処理(約 3.5 日)が可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な予備焼成炉の数は 4 炉である。

(8)真空焼成炉

真空焼成炉の 1 設備あたりの処理量を燃料コンパクト数で約 700 個(約 10kg-U)とした。 UO_2-H_2O 均質の臨界計算の結果、W20cm の無限平板体系で未臨界である。焼成を行う黒鉛ボードは予備焼成炉と兼用するものとした。黒鉛ボードには、1 ボードあたり約 40 個の燃料コンパクトを投入できるため、燃料コンパクト約 700 個の処理には約 40 枚の黒鉛ボードが必要になる。そこで、真空焼成炉の加熱室における黒鉛ボードの配置を 6 段、3 列とし、加熱室の長さを 100cm とした。この設計により真空焼成炉は、1 設備あたり約 10kg-U の処理が可能であり、約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な真空焼成炉の数は 4 炉である。

(9)燃料コンパクトウラン量測定装置

燃料コンパクトのウラン量測定装置は、燃料コンパクト約 700 個(約 10kg U)の検査を 1 日で完了させる設計とした。燃料コンパクトのウラン量測定には、1 コンパクトあたり約 3 分を要することから、1 日の検査時間を 8 時間とすると、約 700 個の検査に 35 時間を要する。そこで、測定を行う測定器の数を 8 台とし、1 日で約 700 個の処理を完了するものとした。 UO_2-H_2O 均質の臨界計算の結果、W40cm、H36cm の無限平板体系で未臨界である。そこで、燃料コンパクトウラン量測定装置は、各検査設備を 4 列で直線的な配置とし、1 列あたりの幅を約 10cm とした。

約 40kg-U/日の製造量を担保するのに必要な設備の数は、4 設備となるが、夜間も自動で検査を行うことでその設備数を半分とすることができますため、燃料コンパクトウラン量測定装置の設備数は 2 設備とした。また、この装置に燃料コンパクトの寸法測定、重

量測定及びマーキング No. の読み取り検査を行う検査設備を付属させる設計とした。

以上の検討による必要な各燃料製造設備の数は 4 設備以下となった。Table 3 に燃料製造設備及び検査設備の数量を示す。この設備数は、HTTR 燃料製造設備を基にした設備数と比較して非常に少ない設備数であり、設備費、人件費等の削減が図れることからコスト削減の点において有効である。

(3) 燃料製造建屋

燃料製造建屋は、燃料製造設備、検査室、ウラン貯蔵庫等から構成される。また、基本的に鉄筋コンクリート造りとし、壁厚は 200mm とする。主建屋のサイズは、燃料製造設備、貯蔵庫などの設置寸法を基にした配置により定めることができる。そこで、主建屋に配置される主要な設備、部屋等の設置寸法の検討を行い、主建屋の大きさを定めることとした。

各燃料製造設備の設置寸法を、設備の数量、各設備のウラン取り扱い領域、及び HTTR 燃料製造設備の設置寸法を参考に定めた。各製造設備の設置寸法を Table 4 に示す。

貯蔵庫については、各貯蔵庫の貯蔵量を想定し、モンテカルロ計算コード KENO-Va(SCALE4 システム)を用いた臨界計算によりサイズを決定した。各貯蔵庫の貯蔵量を以下に示す。

- ・原料ウラン貯蔵庫

原料ウラン粉末の貯蔵量を 1 年間の製造量(歩留まりを考慮)である約 8.5ton-U とした。

- ・燃料核貯蔵庫

燃料核が次工程の被覆工程に供給可能となるには、燃料核工程の検査が終了していないければならない。製造計画では、この工程間におけるタイムラグを 10 日間とした。よって、10 日間分の燃料核製造量である約 400kg-U の保管が最低でも必要となる。これに設備の軽微な故障等による停止(5 日間を想定)に対する余裕を見込んで、燃料核貯蔵庫の貯蔵量を約 600kg-U とした。

- ・被覆燃料粒子貯蔵庫

燃料核貯蔵庫と同様の考え方に基づき、貯蔵量を約 600kg-U とした。

- ・燃料コンパクト貯蔵庫

燃料コンパクトが製造及び検査を終えて、次の燃料体組立工程に供給されるまで、約 10 日を要する。よって、最低でも 10 日間分の製造量である約 400kg-U(燃料コンパクト 約 28000 個)の保管が必要となる。さらに、燃料体の組立に必要な黒鉛ブロックの調達及び燃料体の組立に不測の事態(10 日間を想定)が生じる可能性を考慮して、燃料コンパクト貯蔵庫の貯蔵量を約 20 日分の製造量にあたる約 800kg-U(燃料コンパクト 約 56000 個)の貯蔵量とした。

- ・製品保管庫

燃料体の保管は、年間生産量の半分である約 360 体とした。

また、分析室、燃料核・被覆燃料粒子検査室、出荷ヤード、給気室・排気室についても検討を行い、サイズを決定した。燃料製造設備以外の、燃料製造建屋の主要な部屋のサイズを Table 5 に示す。

燃料製造設備、貯蔵庫、検査室等のサイズを基に配置の検討を行い、燃料製造建屋の大きさを定めた。燃料製造建屋1階部分の配置をFig.6に示す。1階部分には、燃料製造設備、検査室、貯蔵庫、出荷ヤード、廃液処理室、放射線管理室があり、大きさは92m×61m(床面積5612 m²)である。2階部分には、給排気室(20m×16m、床面積320 m²)、事務所(25m×15m、床面積375 m²)を配置した。

また、その他に、製造に使用する薬品、設備の交換部品等を保管する保管倉庫(15m×10m、床面積150 m²)、純水精製設備等を設置する付属建屋(10m×10m、床面積100 m²)を想定する。なお、保管倉庫及び付属建屋の構造は、燃料製造建屋よりも簡単な鉄筋スレート造りとした。

3.3 燃料製造コストの検討

燃料製造コストとして、燃料製造プラントの建屋建設費、燃料製造設備費、燃料製造において発生する材料及び消耗品等の費用、人件費、及び再転換費($UF_6 \rightarrow U_3O_8$)を検討した。

(1)燃料製造建屋費

燃料製造建屋の建設費用は、概略設計を行った主建屋(燃料製造建屋)、保管倉庫及び付属建屋の床面積並びに建屋の構造を基に算出した。費用算出の前提条件として、建屋の構造別に建設単価を以下のように想定した。

建屋構造	建設単価
鉄筋コンクリート造り(1階)	約30万円/m ²
鉄筋コンクリート造り(2階)	約20万円/m ²
鉄筋スレート造り	約15万円/m ²

また、主建屋に配置されている黒鉛加工室(1階)、事務所(2階)は、ウランを扱わないことから、構造を簡易にすることができるため、建設単価をそれぞれ、約20万円/m²、約15万円/m²とした。

建屋床面積と、建設単価から、燃料製造建屋の建設費を見積もると、約18億円となる。建設費の他に、燃料製造建屋に付属する設備として、給排気設備、クレーン、放射線機器、冷却材供給設備等があり、HTTR燃料製造施設を参考に、これらの総額を約8.5億円と推定した。従って、燃料製造建屋費は、総額26.5億円となる。内訳を以下に示す。

項目	床面積	建設費
主建屋 1階(黒鉛加工室を除く)	5237 m ²	約17.6億円
1階(黒鉛加工室)	375 m ²	
2階(給排気室)	320 m ²	
2階(事務所)	375 m ²	
保管倉庫	150 m ²	約0.2億円
付属建屋	100 m ²	約0.2億円
付属設備(給排気設備、クレーン等)		約8.5億円

(2)燃料製造設備費

燃料製造設備は、燃料製造に直接係る設備とし、以下に示すように分類した。また、各項

目の燃料製造設備費に占める割合も併せて示す。工程ごとの燃料製造設備数、及び HTTR 燃料製造施設を参考に設備の処理量のスケールアップを考慮して推定した設備費を Table 6 に示す。燃料製造設備費の総額は、約 58.2 億円となる。

項目	内容	割合
燃料製造設備	燃料製造に直接係る設備	約 80%
検査設備	燃料検査に係る検査設備	約 10%
燃料製造プラント運営システム	工程、品質、計量管理に必要な管理システム	約 5%
その他の付属設備	中間製品、製品の貯蔵庫等とその付属設備	約 5%

(3) 人件費

人件費は、燃料製造のために必要な人員、検査に必要な人員、工程管理、品質管理、及びウラン計量管理等の工場運営システムの運用に必要な人員を対象として検討した。このとき、商業規模プラントを想定したことによる量産効果として、高品質の燃料が安定的に得られることによる検査頻度の削減、及び燃料製造技術の進歩による燃料製造設備の自動運転に近い形での製造が可能になると仮定した。燃料製造のために必要な人員の数を燃料製造工程ごとにまとめて Table 7 に示す。

燃料の検査頻度については、品質が安定していることを前提として合理化を行うこととし、暫定的に製造バッチごととする。具体的には、燃料製造設備 1 バッチあたりの処理量が約 10kg-U の工程では、年間製造量約 8.5ton-U に対し約 850 バッチとなり、検査頻度は年間約 850 となる。また、1 バッチあたりの処理量が約 40kg-U の工程(燃料核工程における連続焼結炉、燃料コンパクトにおける予備焼成炉)では、約 213 バッチとなり、検査頻度は年間約 213 となる。燃料検査項目ごとの検査頻度を Table 8 に示す。

これらの検討結果を基に、1 年当たりの人件費を見積もると約 14.3 億円(製造: 約 8.7 億円、検査: 約 5.6 億円)となった。

(4) 材料及び消耗品等の費用

燃料製造に必要な材料及び消耗品は以下に示すように分類される。

① 燃料製造に必要な原材料のうち原料ウランを除いたもの

最終的に製品の一部をなすものであり、代表的なものとして、燃料体を構成する黒鉛ブロック、燃料コンパクトの黒鉛マトリックスの原料である天然黒鉛粉末、人造黒鉛粉末等が挙げられる。

② 燃料製造に必要な補助材料

燃料製造において補助的に消費される材料であり、代表的なものとして、燃料核工程の ADU 粒子生成工程において滴下原液の調整の時に添加される添加剤が挙げられる。

③ 燃料製造設備の消耗部品

燃料の製造に伴い消耗し交換を必要とする各燃料製造設備の部品であり、該当するものとして、焼結結炉などのヒータ類が挙げられる。

④ 燃料検査で使用される補材等

被覆燃料粒子の断面組織検査用の金相試料を作るために用いる研磨剤等が挙げられる。

(5) 検査設備の消耗部品

検査設備の消耗部品としては、被覆燃料粒子の被覆層厚さ検査において被覆燃料粒子のX線乾板写真の撮影を行う軟X線装置の乾球等が挙げられる。

(6) その他

燃料製造、検査において消費されるゴム手袋、ウエスなどの一般材料が挙げられる。

燃料製造において使用される主要な材料及び消耗品を、燃料の製造工程ごとに摘出した結果をTable 9に示す。材料及び消耗品は、連続的に長期にわたる購入を行うことで、その費用が低下すると考えられる。そこで、30%の割引を仮定すると、1年あたりの材料及び消耗品の費用は約22.7億円と見積もられる。

(5) 再転換費

本検討では、燃料製造プラントに供給される原料ウランとして U_3O_8 を想定しており、 $UF_6 \rightarrow U_3O_8$ は再転換プラントにより行われるものとした。再転換($UF_6 \rightarrow UO_2$)費の例として1.0万円/kg-Uという単価が文献⁽⁶⁾に示されている。ガス炉燃料製造においては、原料ウランとして U_3O_8 を用いるため、再転換の製品形態がことなるが、ここでは上記の単価を用いることとし、1年当たりの再転換費を見積もると約0.8億円となる。

(6) 燃料製造コスト

燃料製造コストは、燃料製造建屋費、燃料製造設備費、人件費、材料及び消耗品費、及び再転換費の和となる。このうち、人件費、材料及び消耗品費、及び再転換費は燃料製造において定常に発生する費用であるのに対し、燃料製造建屋費、及び燃料製造設備費は、燃料製造プラント建設時に発生する費用である。そこで、燃料製造プラントの実質的な耐用年数を30年と仮定し、毎年1/30の費用を負担するものと想定した。

従って、燃料製造コストを見積もると1年当たり約40.6億円となる。燃料製造コストの内訳を以下に示す。

項目	1年当たりの費用	割合(%)
燃料製造建屋費	約0.9億円	2
燃料製造設備費	約1.9億円	5
人件費	約14.3億円	35
材料及び消耗品費	約22.7億円	56
再転換費	約0.8億円	2
合計	約40.6億円	100

Table 3 燃料製造プラントの燃料製造設備及び検査設備の数量

工程	小工程名	製造品(中間品) 又は、検査項目	設備名称	設備の形状	設備のバッチサイズ (kg-l/設備)	設備の処理能力 (バッチ/日)	設備数
燃料核	滴下、原液調整、滴下、熟成 洗浄、乾燥 焙焼	ADU粒子 UO ₃ 粒子	ADU粒子生成装置 焙焼炉	Φ20cm、円筒 W30cm、H11cm、平板	10.0	1	4
	焙結	UO ₂ 粒子	焙結炉	W30cm、H9cm、平板	40.0	1	1
	真球度選別	UO ₂ 粒子	真球度選別機		10.0	(夜間自動運転)	2
被覆	被覆(第1層～第4層)	被覆燃料粒子	流動床	Φ17.4cm、円筒	10.0	1	4
	真球度選別	被覆燃料粒子	真球度選別機		10.0	(夜間自動運転)	2
燃料コンパクト	黒鉛マトリックス調整設備	調整黒鉛粉末	黒鉛マトリックス調整 装置	240(kg黒鉛粉末)		1	1
	オーバーコート	オーバーコート粒子	オーバーコート装置	Φ40cm、円筒	10.0	1	4
	オーバーコート粒子選別	オーバーコート粒子	真空度選別機		10.0	(夜間自動運転)	2
	燃料コンパクト成型	燃料コンパクト	燃料コンパクト成型ア レス機	W20cm、H58cm、平板	10.0	1	4
	予備焼成	燃料コンパクト	予備焼成炉	W20cm、平板	40.0	(処理に約3.5日)	4
焼成	燃料コンパクト		真空焼成炉	W20cm、平板	10.0	1	4
	燃料体組立	燃料体	燃料体組立装置		-	-	1
	燃料核検査	直径、真球度検査	PSA、PDA装置		-	-	1
検査設備	被覆燃料粒子検査	被覆層厚さ検査	被覆層検査装置、 軟X線発生装置		-	-	1
	被覆燃料粒子検査	被覆第2層、第4層の 光学的異方性検査	OPTAF装置		-	-	1
	燃料コンパクト検査	ウラン量、寸法、重量、 充填率、マトリックス密度	燃料コンパクトウォラン 量測定装置	W40cm、H36cm、平板	40.0	(夜間自動運転)	2
	燃料核、燃料コンパクト 不純物検査	不純物検査	ICP-MS		-	-	1
	検査総合(分析関係を含む)	燃料核のO/U比、被覆燃料粒 子の破壊強度試験、燃料コン パクトのSi/C比測定、など	分析装置等		-	-	1

Table 4 主要な燃料製造設備の設置サイズ

設備名称	設置サイズ	
	幅 (m)	奥行き (m)
A D U 粒子生成装置	8	4
焙焼炉	2	4
焼結炉	2	14
真球度選別機	2	2
流動床	8	6
オーバーコート装置	2	2
燃料コンパクト成型装置	3	8
予備焼成炉	3	5
真空焼成炉	4	4
燃料コンパクトウラン量 測定装置	1	6

Table 5 燃料製造建屋の主要な部屋のサイズ

名称	幅 (m)	奥行き (m)
原料ウラン貯蔵庫	15	10
燃料核貯蔵庫	5	5
被覆燃料粒子貯蔵庫	5	5
燃料コンパクト貯蔵庫	10	10
製品保管庫	20	20
分析室	8	6
出荷ヤード	25	25
給気室、排気室	16	20

Table 6 燃料製造プラントの設備

項目	工程	内容	設備	設備数	設備費 (億円)
燃料製造設備	燃料核	ADU 粒子生成	ADU 粒子生成装置	4	
		焙焼	焙焼炉	4	
		焼結	焼結炉	1	
		真球度選別	真球度選別機	2	16.0
	被覆	被覆(第1層～第4層)	流動床	4	
		真球度選別	真球度選別機	2	12.2
	燃料コンパクト	黒鉛マトリックス調整	黒鉛マトリックス調整設備	1	
		オーバーコート	オーバーコート装置	4	
		オーバーコート粒子選別	真球度選別機	2	
		燃料コンパクト成型	燃料コンパクト成型装置	4	
		予備焼成	予備焼成炉	4	
		焼成	真空焼成炉	4	20.1
	燃料体組立	燃料体組立	燃料体組立装置	1	0.5
検査設備		燃料核検査	PSA、PDA 装置	1	
		被覆燃料粒子検査(被覆層厚さ検査)	被覆層検査装置、軟 X線発生装置	1	
		被覆燃料粒子検査(被覆第2層、第4層の光学的異方性検査)	OPTAF 装置	1	
		燃料コンパクト検査(ウラン量、寸法、重量、充填率、マトリックス密度)	燃料コンパクトウラント量測定装置	2	
		燃料核、燃料コンパクト不純物検査	ICP-MS	1	
		検査総合(燃料核の O/U 比、被覆燃料粒子の破壊強度試験、燃料コンパクトの SiC 破損率等)	分析設備等	1	
					4.2
燃料製造プラント運営システム			計量管理システム	1	
			品質管理システム	1	
			製造管理システム	1	3.0
その他付属設備			保管容器等	1	2.2

計 58.2

Table 7 燃料製造における必要人員

工程	設備名称	設備数	必要人員(人／日)	備考
燃料核	ADU生成装置	4	4	ADU生成装置を構成する溶解槽等の5つの槽を順次運転する。
	焙焼炉	4	1	
	焼結炉	1	9	24時間運転。昼間は1人焙焼炉の補助。 夜間運転の設備の監視業務を行う。
	真球度選別機	2	1	ADU粒子生成装置の作業補助。
被覆粒子	流動床	4	4	
	選別機	2	1	流動床における作業開始時、終了時の作業補助を行う。
燃料コンパクト	黒鉛(調整)	1	2	
	微粉碎	1	2	
	オーバーコート装置	4	4	
	乾燥、重量費測定作業	4	1	真球度選別機と兼任。予備焼成炉の作業補助。
選別機		2	1	オーバーコート装置によるオーバーコート作業の作業補助。
	燃料コンパク成型装置	4	4	
	予備焼成炉	4	1	真空焼成炉における作業を兼務する。
	真空焼成炉	4	2	予備焼成炉における作業を兼務する。
燃料体組立	燃料組立	1	2	
	管理システム	3	2	

Table 8 燃料検査項目における検査数量

工程	検査項目	抜取率	数量
燃料核	直径	1 試料 / 燃料核製造バッチ	213
	真球度	1 試料 / 燃料核製造バッチ	213
	密度	1 試料 / 燃料核製造バッチ	213
	O / U 比	1 試料 / 原料ウラン	1
	不純物	1 試料 / 燃料核製造バッチ	1
	蒸発性不純物	1 試料 / 原料ウラン	1
	濃縮度	1 試料 / 燃料核製造バッチ	1
被覆燃料粒子	被覆層厚さ (1 ~ 4 層)	3 試料 / 被覆製造バッチ	850
	被覆層密度 (1 ~ 4 層)	3 試料 / 被覆製造バッチ	850
	被覆層の光学的異方性検査 (2 層、 4 層)	1 試料 / 被覆製造バッチ	850
	直径	1 試料 / 被覆製造バッチ	850
	外観	1 試料 / 被覆製造バッチ	850
	断面組織	3 試料 / 被覆製造バッチ	850
	破壊強度	1 試料 / 被覆製造バッチ	1
燃料コンパクト	濃縮度	1 試料 / 原料ウラン	1
	O / U 比	1 試料 / 原料ウラン	1
	原料黒鉛粉末の種類及び 混合比	1 試料 / 黒鉛マトリックス 製造バッチ	1
	バインダーの種類及び 混合比	1 試料 / 黒鉛マトリックス 製造バッチ	1
	粒子充填率	全数	約492000
	不純物	1 試料 / 原料ウラン	1
	露出ウラン率	2 試料 / 燃料コンパクト 製造バッチ	213
	S i C 破損率	3 試料 / 燃料コンパクト製造バッチ	213
	寸法		
	(1) 外径	全数	約492000
	(2) 内径	全数	約492000
	(3) 長さ	全数	約492000
	マトリックス密度	全数	約492000
	外観	全数	約492000
	マーキング	全数	約492000
	圧縮強度	3 試料 / 原料ウラン	1
			1
燃料体	スタック長さ、ウラン量	全数	約492000
	外観、構成部品	全数	720

Table 9 燃料製造における材料及び消耗品

工程	小工程名	設備名称	材料及び消耗部品名	費用(億円)
燃料核	溶解 原液調整 滴下、乾燥 洗浄、乾燥	ADU粒子生成設備	原液粉末溶解補助材料 原液調整剤、添加剤等 消耗部品(滴下ノズル等) 補助材料	
	焙燒 焼結(還元、焼結)	焙燒炉 焼結炉	洗浄、乾燥補助材料 消耗部品	3.0
被覆	被覆(第1層～第4層)	流動床	消耗部品(ヒーター、熱電対等) 被覆原材料(プロピレン等) 被覆活動ガス(A'ガス) 交換部品(反応管、ヒーター類) その他補助材料	10.1
燃料コンパクト	黒鉛マトリックス材調整 オーバーコート 乾燥	黒鉛マトリックス材調整設備 粉碎、小分け設備等 オーバーコート装置 乾燥機	黒鉛マトリックス原材料 黒鉛マトリックス調整及びオーバーコート補助材 オーバーコート装置 乾燥機	3.9
	プレス(燃料コンパクト成型) 予備焼成	燃料コンパクト成型装置 予備焼成炉	交換部品(プレス金型等) 交換部品(ヒター等) 空圧気力ス等	5.4
燃料体 検査(燃料核)	焼成 燃料体組立 燃料核検査 被覆燃料粒子検査 燃料コンパクト検査 燃料体検査	真空焼成炉 燃料体組立装置 検査設備 分析設備	交換部品(ヒーター等) 黒鉛ブロック、部材等 検査葉品 検査葉品 検査消耗部品(軸X線装置乾燥等) その他検査補助材 備品 その他(ゴム手、ウエス等)	0.3 計22.7

高温ガス炉燃料製造フローーシート

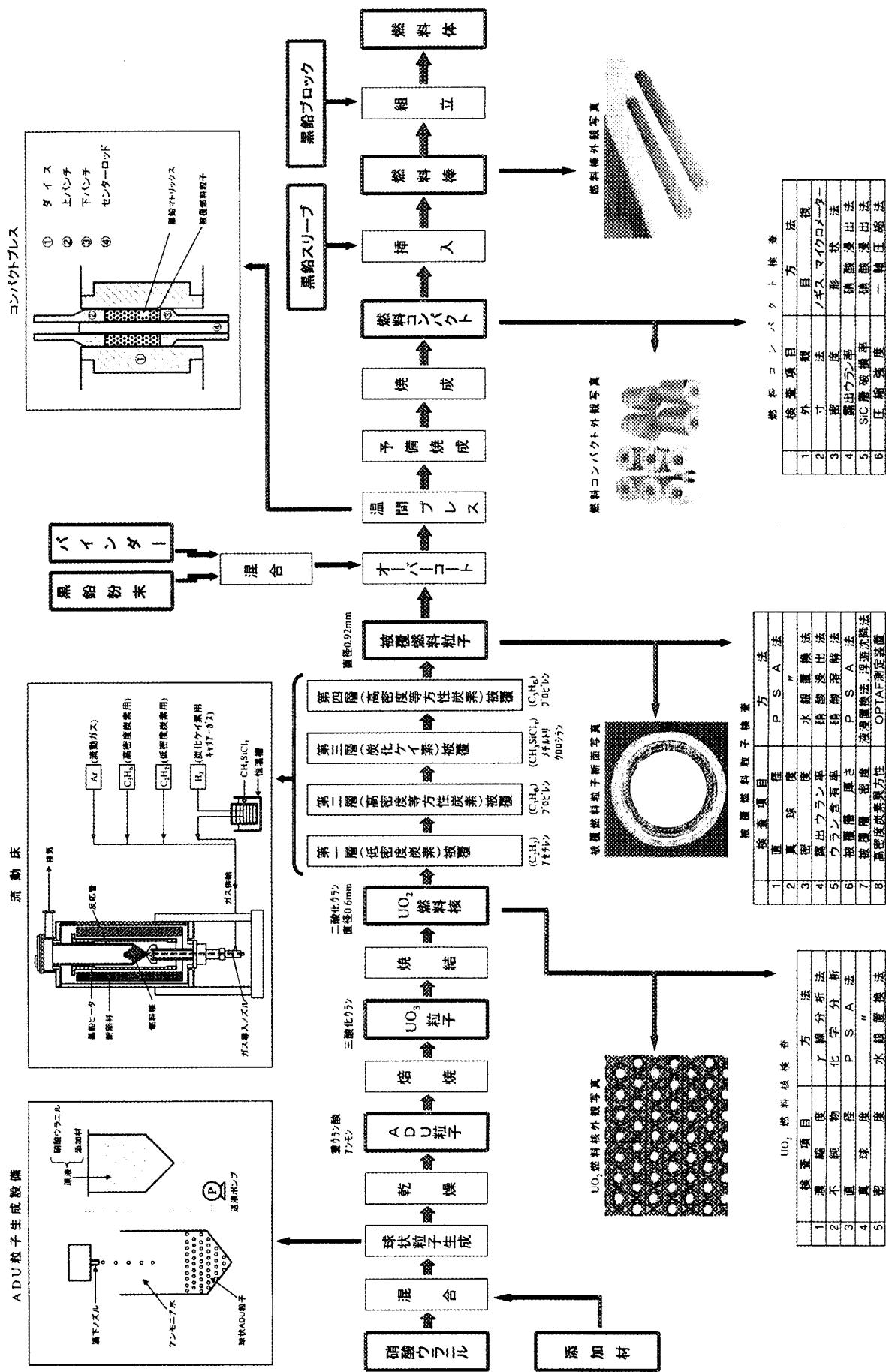
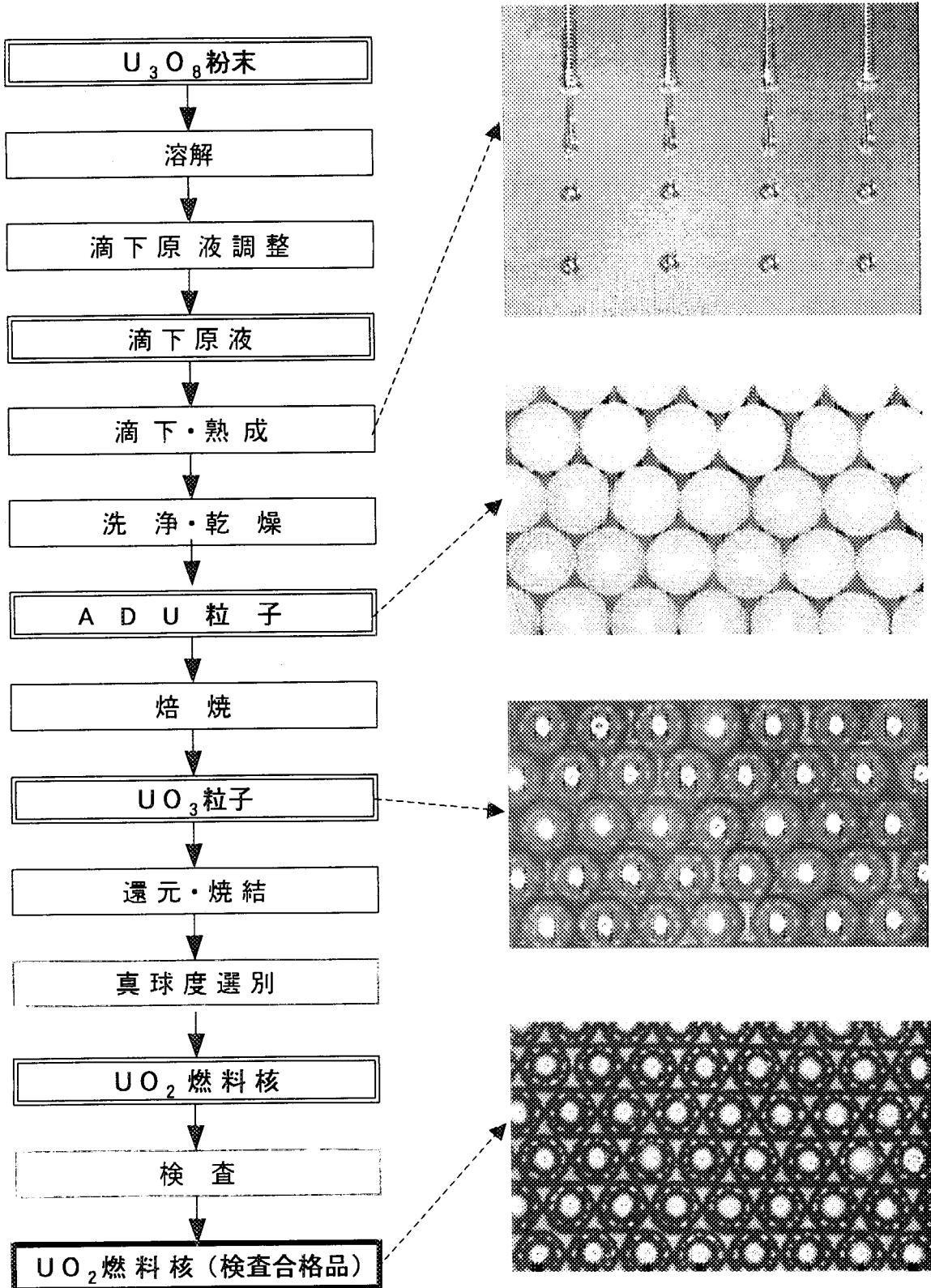


Fig. 3 HTTR 燃料の製造工程

Fig. 4 UO_2 燃料核の製造工程

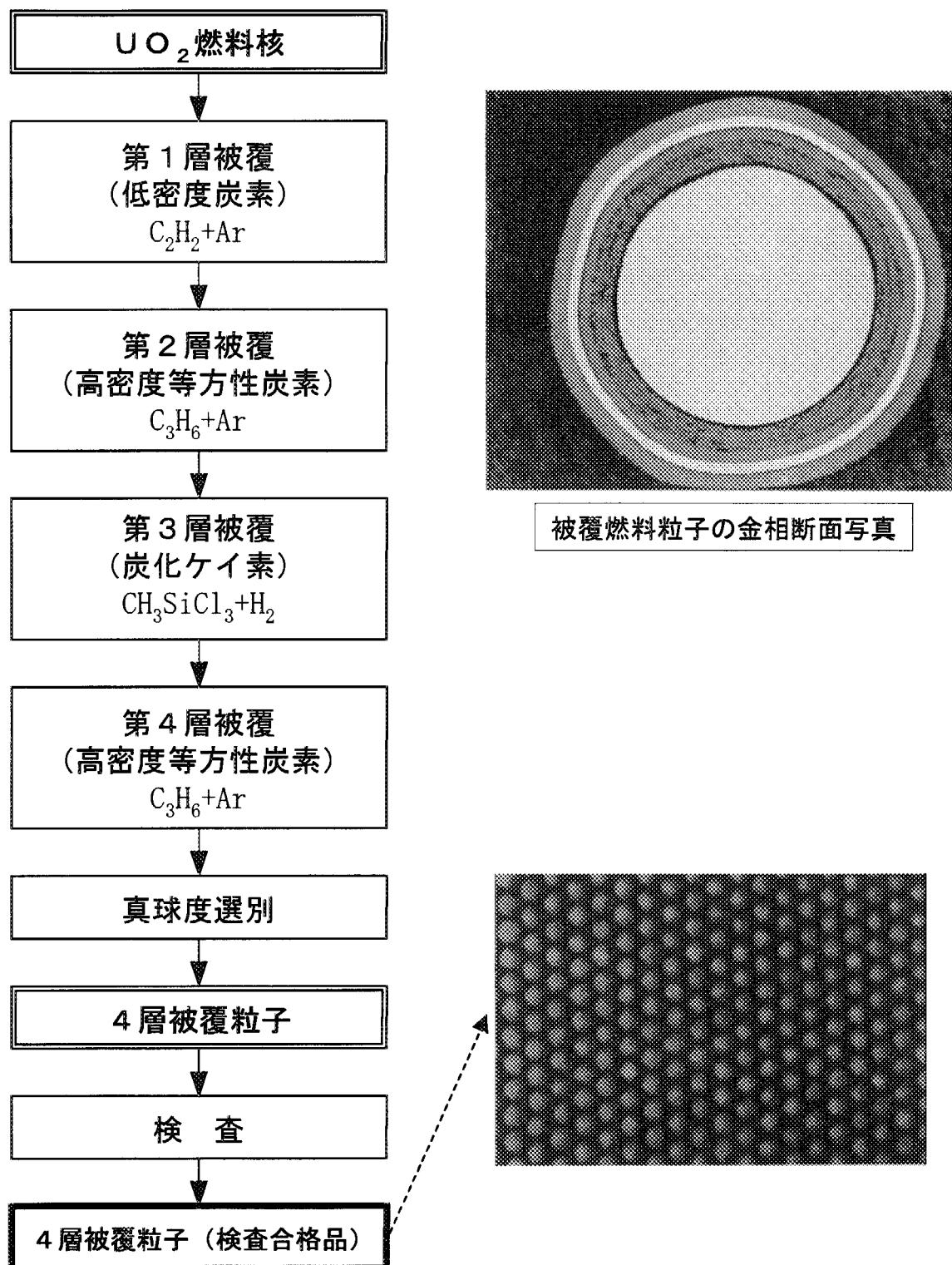


Fig. 5 被覆燃料粒子の製造工程

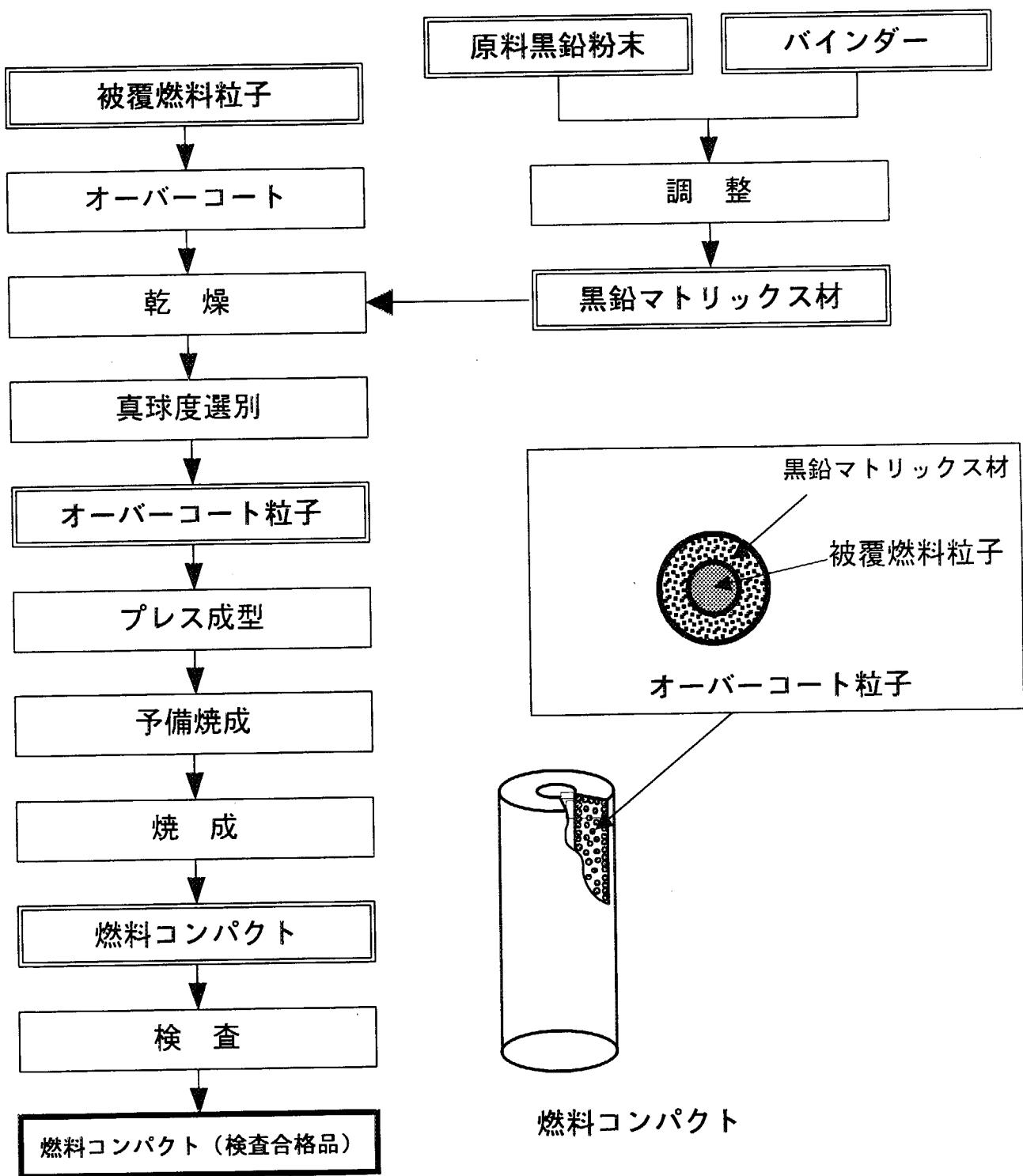
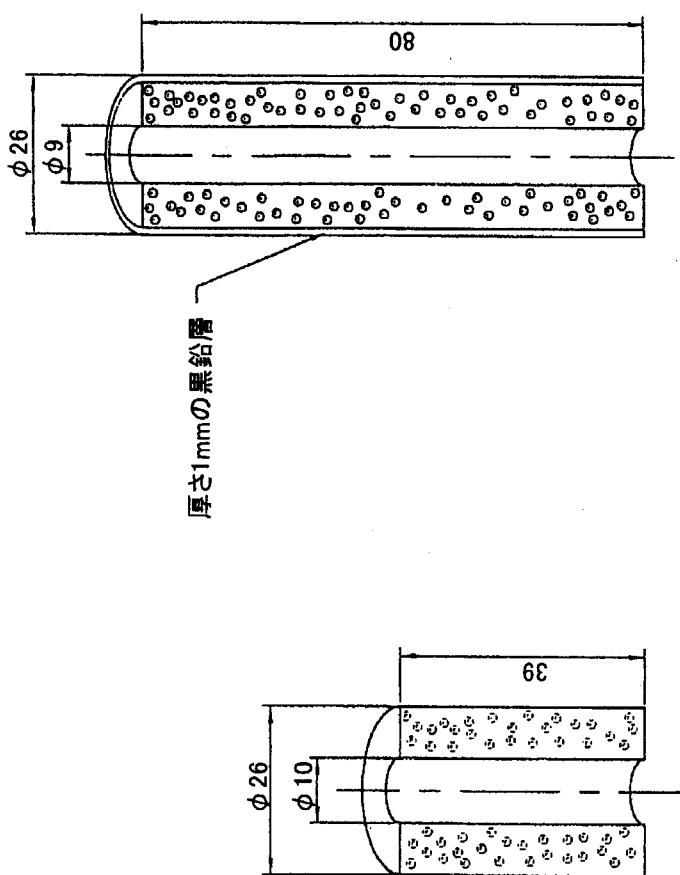


Fig. 6 燃料コンパクトの製造工程



GTHTR300燃料コンパクト

HTTR燃料コンパクト

Fig.7 燃料コンパクトの比較

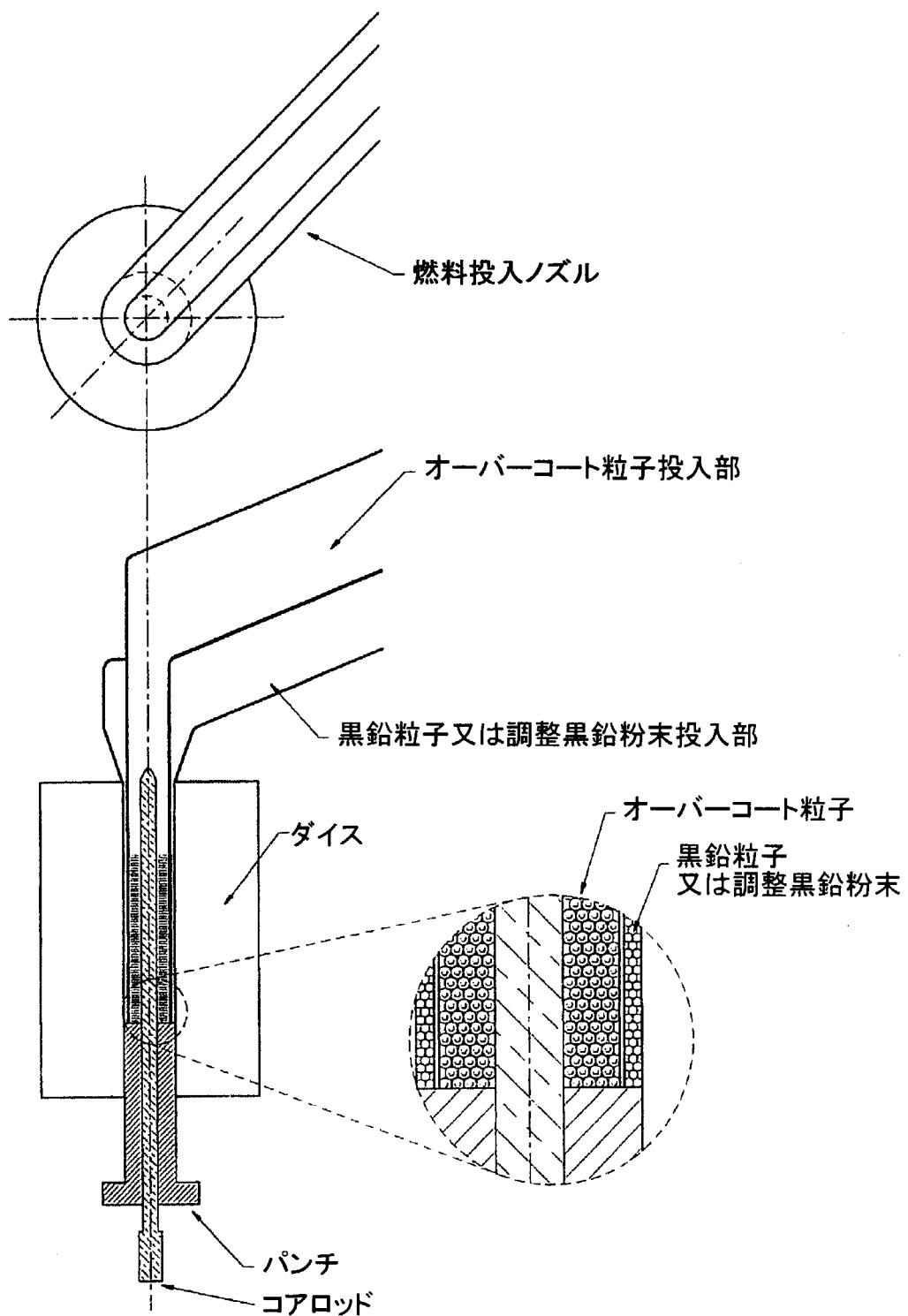


Fig.8 燃料コンパクトの製造法

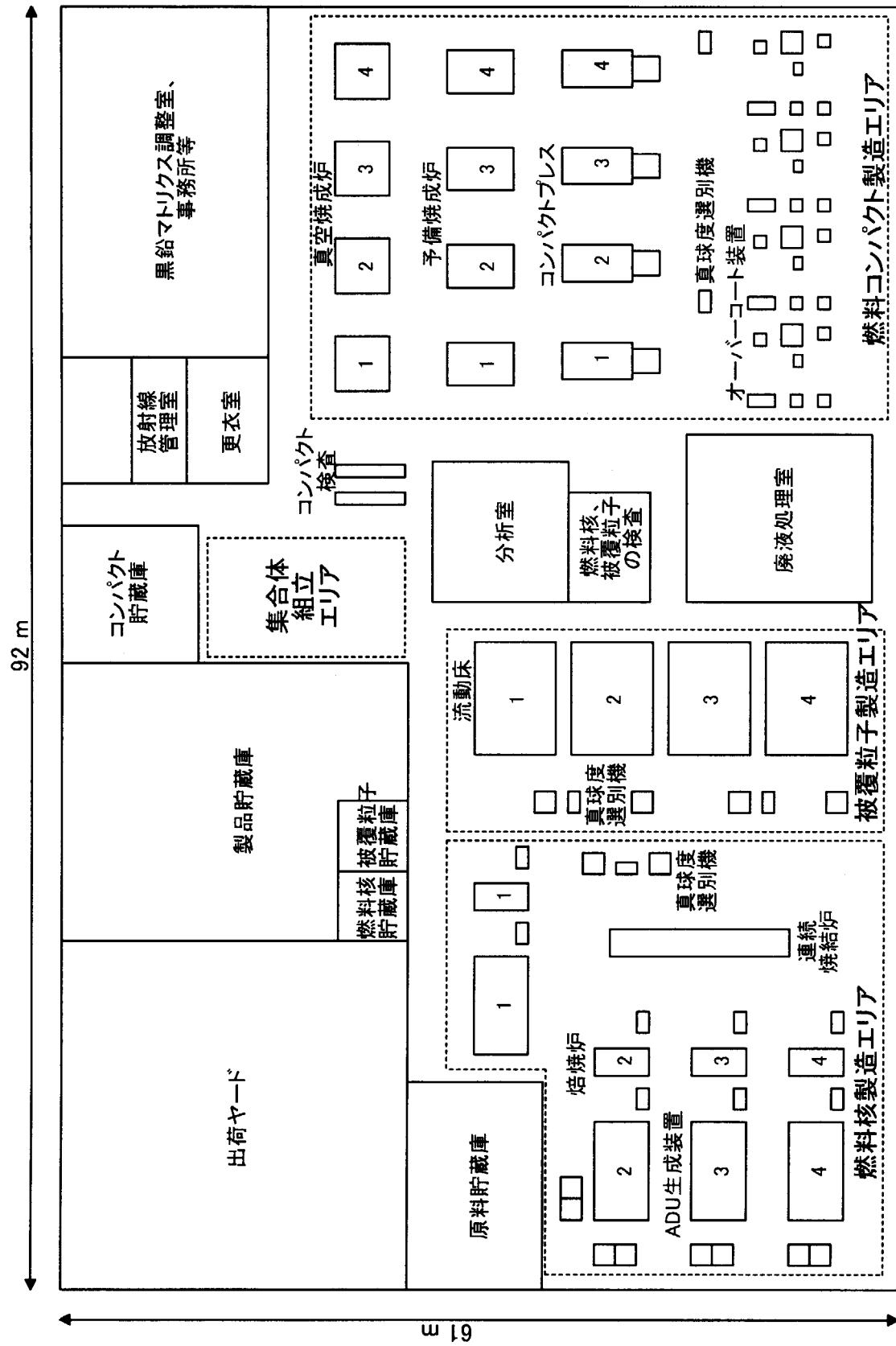


Fig.9 燃料製造建屋配置

4. 燃料サイクルコストの評価

4.1 燃料サイクルコストの計算方法

本検討では、経済協力開発機構・原子力機関（以下、OECD/NEAと略す）の報告書⁽⁷⁾に記載されている均等化核燃料サイクルコストの計算方法に基づき、燃料サイクルコストの評価を行うこととした。この計算方法では、発電所が一定期間運転するものとして、発電のために必要となる燃料費と発生電力量から、燃料サイクルコストを求める。具体的には、

$$\text{燃料サイクルコスト(円/kWh)} = (\text{現在価値換算された全コスト(円)}) \\ / (\text{現在価値換算された発生電力量(kWh)})$$

$$C = A / B$$

の計算式を用いる。

なお、本検討では平衡状態にある原子炉を想定し、取替燃料バッチの燃料サイクルコストを評価することとした。ここで取替燃料バッチとは、炉心に同時に装荷し、炉心から同時に取出しを行う燃料体の数である。従って、それらの燃料体は、同時にエネルギー生成に寄与する。原子炉の運転開始から数サイクル以内に達する平衡状態では、装荷及び取出し燃料の特性とエネルギー発生量は、サイクルが変わっても変化しない。

(1)現在価値換算された全コスト(A)

Aについては、各燃料サイクルコスト項目ごとに取替燃料バッチあたりの発生費用を算出し、それに対してエスカレーションと現在価値換算率を考慮し、以下のように積算する。

$$A \text{ (円)} = \sum [M_i \times P_i \times (1+s_i)^{t_c - t_b + t_i} \times \{1 / (1+r)\}^{t_i}]$$

M_i : 取替燃料バッチあたりの所要重量 (kg)

P_i : 単価 (円/kg)

s_i : エスカレーション (fraction/年)

r : 現在価値換算率(金利) (fraction/年)

t_b : 貨幣価値の基準年

t_c : 燃料装荷年

t_i : リードタイム(フロントエンドについて、燃料装荷時点を基準とする)、または、ラグタイム(バックエンドについて、燃料取出時点を基準とする) (年)

1	1	2	3	4
項目	ウラン採鉱・製錬	転換	濃縮	再転換・成型加工
	5	6	7	
	中間貯蔵	再処理	廃棄物処理・処分	

①ウラン採鉱・製錬

$$F_1 = M_1 \times P_1 \times (1+s_1)^{t_c - t_b + t_1} \times \{1 / (1+r)\}^{t_1}$$

$$M_1 = (1+L2) \times (1+L3) \times (1+L4) \times (\varepsilon_p - \varepsilon_t) / (\varepsilon_f - \varepsilon_t) \times M_4$$

L_i : ロス率 (fraction)

ε : 濃縮度 (wt%、p: 濃縮ウラン、f: 天然ウラン、t: 劣化ウラン)

(2) 転換

$$F2 = M2 \times P2 \times (1+s2)^{tc-tb+t2} \times \{1/(1+r)\}^{t2}$$

$$M2 = (1+L2) \times (1+L3) \times (1+L4) \times (\varepsilon p - \varepsilon t) / (\varepsilon f - \varepsilon t) \times M4$$

(3) 濃縮

$$F3 = M3 \times SWU \times P3 \times (1+s3)^{tc-tb+t3} \times \{1/(1+r)\}^{t3}$$

$$M3 = (1+L3) \times (1+L4) \times M4$$

$$SWU = Mp \times Vp + Mt \times Vt - Mf \times Vf$$

$$Vn = (2 \times \varepsilon n - 1) \times \ln\{\varepsilon n / (1 - \varepsilon n)\}, n: p, f, t$$

$$Mp = 1.0, Mt = Mf - Mp, Mf = Mp \times (\varepsilon p - \varepsilon t) / (\varepsilon f - \varepsilon t)$$

(4) 再転換・成型加工

$$F4 = M4 \times P4 \times (1+s4)^{tc-tb+t4} \times \{1/(1+r)\}^{t4}$$

$$M4 = (1+L4) \times M4$$

(5) 中間貯蔵

$$F5 = M5 \times P5 \times (1+s5)^{tc-tb+t5+tr} \times \{1/(1+r)\}^{t5}$$

$$M5 = \text{取出し重金属量}$$

$$tr: 炉内滞在期間(年)$$

(6) 再処理

$$F6 = M6 \times P6 \times (1+s6)^{tc-tb+t6+tr} \times \{1/(1+r)\}^{t6}$$

$$M6 = \text{取出し重金属量} (= M5)$$

(7) 廃棄物処理・処分

$$F7 = M7 \times P7 \times (1+s7)^{tc-tb+t7+tr} \times \{1/(1+r)\}^{t7}$$

$$M7 = \text{取出し重金属量} (= M5)$$

(2) 現在価値換算された発生電力量(B)

$$B(\text{kWh}) = Eb \times Rc$$

$$Eb: バッチ当たりの発生電力 (kWh)$$

$$Eb = Ed \times 1.0E+6 \times 24 \times Wd \times Ef / 100$$

$$Ed: バッチ平均取出燃焼度 (GWd/t)$$

$$Wd: バッチ U 重量 (ton-U)$$

$$Ef: 熱効率 (%)$$

$$Rc: 連続割引による現在価値換算係数$$

$$Rc = \{1 - \exp(-r' \times tr)\} / \{r' \times tr\}$$

$$r' = \ln(1+r), r: 現在価値換算率(fraction)$$

$$tr: 炉内滞在期間(年)$$

$$= サイクル長さ(年) \times バッチ数 / 稼働率(fraction)$$

4.2 燃料サイクルコストの検討

(1)コスト単価の想定

燃料サイクルコストの評価で用いる燃料サイクルの各コンポーネントのコスト単価を次のように想定した。詳細を付録 2 に示す。

①ウラン採鉱・製鍊、転換、濃縮

通産省資源エネルギー庁は、総合エネルギー調査会原子力部会第 70 回会合⁽²⁾で、原子力発電（軽水炉）による発電原価の試算結果を発表した。これによると、軽水炉の燃料サイクルコスト（燃料費）は 1.65 円/kWh と試算されている。内訳を Table 10 に示す。この軽水炉の燃料サイクルの経済性評価を基に、OECD/NEA の報告書⁽⁷⁾に記載されている均等化核燃料サイクルコストの計算方法に基づき、コスト単価を算出した結果を以下に示す。また、OECD/NEA の報告書⁽⁷⁾に記載されている値を 130 円/ \$ を仮定して円換算したものも参考値として示す。両者は近い値であり、算出したコスト単価は妥当な範囲であると考えられる。

項目	コスト単価	参考値（130 円/ \$ を仮定）
ウラン採鉱・製鍊	0.60 万円/kg-U	0.52~1.17 万円/kg-U
転換	0.09 万円/kg-U	0.08~0.14 万円/kg-U
濃縮	1.58 万円/kg-SWU	1.04~1.69 万円/kg-SWU

②再転換・成型加工

再転換・成型加工単価は、燃料製造に係る発生費用（約 40.6 億円/年）と、燃料製造プラントの処理量（約 7.7 ton-U/年）から、約 52.8 万円/kg-U と評価できる。

③中間貯蔵

付録 2 に示したとおり、①ウラン採鉱・製鍊、転換、濃縮、と同様に、軽水炉サイクルの経済性評価を基に算出すると約 1.5 万円/kg-HM となる。さらに、ガス炉燃料のウラン密度、発熱率等を考慮し、コンクリートキャスクによるガス炉使用済燃料の中間貯蔵単価を約 2.9 万円/kg-HM と概略評価した。

④再処理、廃棄物処理・処分

高温ガス炉使用済燃料の再処理では、UO₂燃料核を取り出すための前処理工程が必要になることから再処理単価は、軽水炉よりも高価格になると想定される。しかしながら、商用規模での高温ガス炉使用済燃料再処理の実績がないことから、軽水炉ベースの単価を参考として用いることとする。付録 2 に示したとおり、①ウラン採鉱・製鍊、転換、濃縮、と同様に、軽水炉サイクルの経済性評価を基に算出すると、再処理単価 31.66 万円/kg-HM、廃棄物処理・処分単価 55.08 万円/kg-HM となる。

高温ガス炉使用済燃料のバックエンドについては、バックエンドコストの評価を今後、行う必要がある。

(2)燃料サイクルコストの算出

GTHTR300 の平衡サイクルを想定して、燃料サイクルコストの算出を行った。計算条件として、炉心主要諸元、コスト単価等を Table 11 に示す。

①ウラン採鉱・製鍊費

$$F1 = M1 \times P1 \times R1$$

M1 : 所要天然ウラン量

P1 : ウラン採鉱・製鍊単価

R1 : 現在価値換算係数

所要天然ウラン量は次のとおりである。

$$\begin{aligned} M1 &= (1+L2) \times (1+L3) \times (1+L4) \times (\varepsilon p - \varepsilon t) / (\varepsilon f - \varepsilon t) \times M4 \\ L_i &: ロス率、\varepsilon: 濃縮度 (wt%、p: EU、f: NU、t: DU) \\ &= 1.005 \times 1.0 \times 1.01 \\ &\quad \times (14.0\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%}) / (0.711\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%}) \times 3845.0\text{kg U} \\ &= 1.164 \times 10^5\text{kg U} \end{aligned}$$

また、現在価値換算係数は次の式のようになる。

$$\begin{aligned} R1 &= (1+s1)^{tc-tb+t1} \times \{1 / (1+r)\}^{t1} \\ &= (1+0.0)^{tc-tb+(-2.0)} \times \{1 / (1+0.03)\}^{-2.0} = 1.061 \end{aligned}$$

よって、ウラン採鉱・製鍊費は次のとおりである。

$$\begin{aligned} F1 &= M1 \times P1 \times R1 = 1.164 \times 10^5\text{kg U} \times 0.60\text{万円/kg U} \times 1.061 \\ &= 7.37 \times 10^4\text{万円} \end{aligned}$$

②転換費

$$F2 = M2 \times P2 \times R2$$

P2 : 転換単価

所要天然ウラン量は、①と同じであり、M2=M1=1.164×10⁵kg-Uである。また、現在価値換算係数は、

$$R2 = (1+0.0)^{tc-tb+(-1.5)} \times \{1 / (1+0.03)\}^{-1.5} = 1.045$$

である。よって、転換費は次のとおりである。

$$F2 = 1.164 \times 10^5\text{kg U} \times 0.09\text{万円/kg U} \times 1.045 = 1.07 \times 10^4\text{万円}$$

③濃縮費

$$F3 = M3 \times SWU \times P3 \times R3$$

M3 : 所要濃縮ウラン量

P3 : 濃縮単価

SWU : 分離作業単位

所要濃縮ウラン量は次のとおりである。

$$\begin{aligned} M3 &= (1+L3) \times (1+L4) \times M4 = 1.0 \times 1.01 \times 3845.0\text{kg U} \\ &= 3.883 \times 10^3\text{kg U} \end{aligned}$$

分離作業単位は次の式のとおりである。

$$SWU = Mp \times Vp + Mt \times Vt - Mf \times Vf$$

$$Vn = (2 \times \varepsilon n - 1) \times \ln(\varepsilon n / (1 - \varepsilon n))、n : p, f, t$$

$$Mp = 1.0, Mt = Mf - Mp, Mf = Mp \times (\varepsilon p - \varepsilon t) / (\varepsilon f - \varepsilon t)$$

従って、

$$\begin{aligned} SWU &= 1.0 \times 1.031 + (29.826 - 1.0) \times 5.959 - 29.826 \times 4.869 \\ &= 27.863 \text{ kg-SWU} \end{aligned}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$R3 = (1 + 0.0)^{tc - tb + (-1.0)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-1.0} = 1.030$$

である。よって、濃縮費は次のとおりである。

$$\begin{aligned} F3 &= 3.883 \times 10^3 \text{ kg-U} \times 27.863 \text{ kg-SWU} \times 1.58 \text{ 万円/kg-U} \times 1.030 \\ &= 1.76 \times 10^5 \text{ 万円} \end{aligned}$$

(4)再転換・成形加工費

$$F4 = M4 \times P4 \times R4$$

M4 : 所要濃縮ウラン量

P4 : 再転換・成型加工単価

所要濃縮ウラン量は次のとおりである。

$$M4 = (1 + L4) \times M4 = 1.01 \times 3845.0 \text{ kg-U} = 3.883 \times 10^3 \text{ kg-U}$$

また、現在価値換算係数は、

$$R4 = (1 + 0.0)^{tc - tb + (-0.5)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-0.5} = 1.015$$

である。よって、再転換・成形加工費は次のとおりである。

$$F4 = 3.883 \times 10^3 \text{ kg-U} \times 52.80 \text{ 万円/kg-U} \times 1.015 = 2.08 \times 10^5 \text{ 万円}$$

(5)中間貯蔵費

$$F5 = M5 \times P5 \times R5$$

M5 : 取出重金属量

P5 : 中間貯蔵単価

取出重金属量は、

$$M5 = \text{取出 U 重量} + \text{取出 Pu 重量 (バッチ当たり)}$$

$$= 3.130 \times 10^3 \text{ kg-U} + 9.070 \times 10^1 \text{ kg-Pu} = 3.221 \times 10^3 \text{ kg-HM}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$\begin{aligned} R5 &= (1 + s5)^{tc - tb + t5 + tr} \times \{1 / (1 + r)\}^{(t5 + tr)} \\ &= (1 + 0.0)^{tc - tb + 5.0 + 4.44} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(5.0 + 4.44)} = 0.756 \end{aligned}$$

である。よって、中間貯蔵費は次のとおりである。

$$F5 = 3.221 \times 10^3 \text{ kg-HM} \times 2.90 \text{ 万円/kg-HM} \times 0.756 = 7.06 \times 10^3 \text{ 万円}$$

(6)再処理費

$$F6 = M6 \times P6 \times R6$$

P6 : 再処理単価

取出重金属量は、(5)と同じであり、M6 = M5 = 3.221 × 10³ kg-HM である。また、現在価値換算係数は、

$$R6 = (1 + 0.0)^{tc - tb + 6.0 + 4.44} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(6.0 + 4.44)} = 0.734$$

である。よって、再処理費は次のとおりである。

$$F6 = 3.221 \times 10^3 \text{ kg-HM} \times 31.66 \text{ 万円/kg-HM} \times 0.734 = 7.49 \times 10^4 \text{ 万円}$$

(7)廃棄物処理・処分費

$$F7 = M7 \times P7 \times R7$$

P7 : 廃棄物処理・処分単価

取出重金属量は、(5)と同じであり、 $M7 = M5 = 3.221 \times 10^3 \text{kg HM}$ である。また、現在価値換算係数は、

$$R7 = (1 + 0.0)^{tc - tb + 56.0 + 4.44} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{[56.0 + 4.44]} = 0.168$$

である。よって、廃棄物処理・処分費は次のとおりである。

$$F7 = 3.221 \times 10^3 \text{kg HM} \times 55.08 \text{万円/kg HM} \times 0.168 = 2.97 \times 10^4 \text{万円}$$

(8) 現在価値換算された発生電力量

$$B(\text{kWh}) = E_b \times R_c$$

E_b : バッチ当たりの発生電力 (kWh)

$$= Ed \times 1.0E+6 \times 24 \times Wd \times Ef / 100$$

Ed : バッチ平均取出燃焼度 (GWd/t)

Wd : バッチ U 重量 (ton-U)

Ef : 熱効率 (%)

$$= 112 \text{GWd/t} \times 1.0E+6 \times 24 \times 3.845 \text{ton-U} \times 45.8\% / 100$$

$$= 4.734 \times 10^9 \text{kWh}$$

R_c : 連続割引による現在価値換算係数

$$= \{1 - \exp(-r' \times tr)\} / \{r' \times tr\} = 0.937$$

r' = $\ln(1+r)$ 、 r : 現在価値換算率(fraction)

$$= \ln(1 + 0.03) = 0.0296$$

tr : 炉内滞在期間 (年)

= サイクル長さ(年) × バッチ数 / 稼働率(fraction)

$$= 2 \text{年} \times 2 \text{バッチ} / (90\% / 100) = 4.444 \text{年}$$

従って、現在価値換算された発生電力量は、

$$B = 4.734 \times 10^9 \text{kWh} \times 0.937 = 4.436 \times 10^9 \text{kWh}$$

燃料サイクルコストは次の式により求められる。

$$C(\text{燃料サイクルコスト, 円/kWh})$$

$$= A(\text{総発生費用, 万円}) \times 10000 / B(\text{発生電力量, kWh})$$

上に示した計算から、燃料サイクルコストを求めるとき、(1)ウラン精鉱・製錬から(5)中間貯蔵までを対象とすると、

$$C = 4.75 \times 10^5 \text{万円} \times 10000 / 4.436 \times 10^9 \text{kWh} = 1.07 \text{円/kWh}$$

となる。また、(6)再処理、及び(7)廃棄物処理・処分まで含めて、燃料サイクルコストを求めると、

$$C = 5.80 \times 10^5 \text{万円} \times 10000 / 4.436 \times 10^9 \text{kWh} = 1.31 \text{円/kWh}$$

と評価できる。内訳を以下に示す。

項目	発生費用 (万円)	燃料サイクルコ スト(円/kWh)	割合 (%)
①ウラン採鉱・製錬	7.37×10^4	0.17	13
②転換	1.07×10^4	0.02	2
③濃縮	1.76×10^5	0.39	30
④再転換・成形加工	2.08×10^5	0.47	36
⑤中間貯蔵	7.06×10^3	0.02	1
⑥再処理	7.49×10^4	0.17	13
⑦廃棄物処理・処分	2.97×10^4	0.07	5
合計(①～⑤)	4.75×10^5	1.07	82
合計(①～⑦)	5.80×10^5	1.31	100

GTHTR300 の燃料サイクルコストを、軽水炉の燃料サイクルコスト(Table 10)と比較すると、フロントエンドの割合が高く、バックエンドの割合が低い特徴がある。ガス炉燃料は、軽水炉燃料に対して、濃縮度が高いこと、再転換・成型加工単価が高いことにより、特に、濃縮費、再転換・成型加工費の割合が高くなっている。一方、使用済燃料の発生割合は、ガス炉の方が小さいため、バックエンドの割合はガス炉の方が小さい。

本検討では、再処理及び廃棄物処理・処分単価として軽水炉ベースの単価を参考として用いた結果、バックエンドまで含めた燃料サイクルコストとして、約 1.31 円/kWh との評価を得た。そこで、再処理及び廃棄物処理・処分単価をパラメータとして、軽水炉並の燃料サイクルコスト 1.65 円/kWh(Table 10 参照)となる値を逆算した結果、前処理工程を含めた再処理単価、及び廃棄物処理・処分単価が、軽水炉使用済燃料の 2.5 倍程度なら、軽水炉と同等の経済性とすることができると考えられる。

(3) 燃料設計条件の燃料サイクルコストへの影響

燃料サイクルコストに占める割合の大きい項目である再転換・成形加工について、燃料の仕様が変更された場合のコストインパクトを検討した。変更の可能性のある項目として、濃縮度、被覆粒子の種類数、被覆層の厚さを取り上げた。

① 濃縮度

GTHTR300 燃料の初期濃縮度は 14% であるが、数% 程度の変更は可能性があると考えられる。そこで変動範囲を 10%～20% として燃料製造コストに対する影響を評価した。

濃縮度の変更は、燃料製造設備の臨界安全性の面から、設備の処理容積に影響を与えるため、燃料製造設備の処理量に影響し、製造人件費が変動すると考えられる。燃料製造設備の中で処理容器の寸法によりその処理量が変動する設備を摘出する。その設備は、設備で行われる製造プロセスから、流動床と A D U 粒子生成装置の沈殿槽であると考えられる。

流動床の処理容器である反応管は円筒形状である。流動床における被覆は、反応管の中に被覆ガス並びに流動ガスを導入して、被覆を行う燃料核を適切な流動状態とすること

とが重要であり、円筒形の反応管に無制限に燃料核を充填しても、被覆に適した流動状態は得られない。よって、流動床は粒子の充填高さにある程度の制限があり、反応管はある程度決まると高さになると考えられる。従って、流動床の処理量は、反応管の大きさ、即ち直徑により決まることになる。

また、ADU 粒子生成装置の沈殿槽は、振動ノズルから添加剤により調整された硝酸ウラニルを滴下ノズルで滴下し、球状の ADU 粒子を製造する設備であり、沈殿槽の形状は、流動床と同じ円筒形状である。滴下時の硝酸ウラニルは、表面張力により球形が形成され、落下時にある程度の反応を行い、その形状を保持する。従って、沈殿槽の必要な高さは、滴下に必要な高さと製造を行う ADU 粒子の体積により決まる。一方、ADU 粒子の処理量は、製造時間を同じと仮定した場合、滴下を行う滴下ノズルの数に比例する。滴下ノズルの数は、沈殿槽の直徑に比例するため、ADU 粒子の沈殿槽は槽の直徑によって処理量が変動することになる。

臨界ハンドブック第 2 版⁽⁵⁾によると、水反射体付き均質 $UO_2 \cdot H_2O$ の最小推定臨界下限値は円柱モデルにおいて、濃縮度 10%では直徑 19.8cm、濃縮度 20%では直徑 17.4cm であり、濃縮度を 10%から 20%に変化させた場合、円柱直徑は 2cm 程度小さくなる。この程度の処理容器のサイズ変更が、製造量、製造時間に与える影響は、ほとんどないと考えられる。また、仮に影響があったとしても製造技術開発により解決できる範囲と考えられることから、燃料製造コストに与える影響はないものと考えられる。

しかしながら、濃縮度を変更した場合、サイクル長さ、平均取出燃焼度等の炉心特性が変化するため、燃料サイクルコストは変化するものと考えられる。

②被覆粒子の種類数

2 種類の被覆粒子を用いた 2 粒子燃料コンパクトを想定して影響を評価した。燃料コンパクトに充填される被覆粒子が 2 種類となった場合、製造工程において影響があると考えられるのは、燃料コンパクトの成型工程である。その他の工程は、基本的に燃料製造設備がバッチ処理式であることから、バッチ毎にそれぞれの種類の被覆粒子を製造することで対応が可能である。2 種類の被覆粒子による燃料コンパクトの成型は、燃料コンパクトの中にそれぞれの粒子を均一に分散させる必要がある。従って、混合装置を用いて被覆粒子又はオーバーコート粒子の混合を行う必要があるが、オーバーコート粒子での混合は、黒鉛マトリックス層が剥離する可能性があるため、混合は被覆粒子で行うことが適切であると考えられる。

この混合工程におけるコストの増加は、被覆燃料粒子の混合装置の購入費と、混合における被覆燃料粒子の取り出し、投入作業における人員増加による人件費増加分と考えられる。混合装置装置の購入価格は、数百万円程度と安価なことからコストに影響を与えないものと考えられる。また、必要な作業人員は、その作業量が少ないと他の作業人員が兼務することも可能であると考えられ、人件費の増加はないものと考える。以上のことから、2 種類の被覆粒子を用いた燃料コンパクトの製造は、コストに変動を与えないものと考えられる。

なお、被覆粒子製造工程の主要な設備の多くが 4 設備の構成となっているため、被覆

粒子の種類数として4種類までは、コストに変動を与えない範囲で対応できるものと考えられる。

(3)被覆層の厚さ

被覆燃料粒子の各層の厚さが変更された場合、被覆時間と被覆原料ガス量が変化する。被覆時間の変化は人件費に、被覆原料ガス量の変化は材料費に影響を与える。そこで、被覆燃料粒子の第1層(低密度炭素)の厚さが $30\mu\text{m}$ 変化した場合、第2層(高密度炭素)、第3層(SiC)、第4層(高密度炭素)の厚さが $10\mu\text{m}$ 変化した場合のコストに与える影響を評価した。

被覆燃料粒子の第1層の厚さが $30\mu\text{m}$ 変化することによる被覆時間の変化は数分程度である。また、第2層または第4層の厚さが $10\mu\text{m}$ 変化することによる被覆時間の変化も数分程度であり、人件費に対する影響は無視できる。一方、第3層が $10\mu\text{m}$ 変化することによる被覆時間の変動は1時間程度であり、人件費は1%程度変化する。

被覆原料ガスの単価を考慮すると、第1層の厚さが $30\mu\text{m}$ 変化することによる材料費への影響は無視できる。一方、第2層～第4層それぞれの厚さが $10\mu\text{m}$ 変化することによる材料及び消耗品費への影響は1%程度である。

燃料製造コストの約90%を人件費、材料及び消耗品費が占めることから、再転換・成型加工単価に与える影響は1%程度である。さらに、ウラン精鉱・製錬から中間貯蔵までを対象とした場合、燃料サイクルコストの約44%を再転換・成型加工費が占めることから、燃料サイクルコストへ与える影響は0.4%程度と評価できる。従って、被覆燃料粒子各層の厚さ変更が燃料サイクルコストに及ぼす影響は小さい。

Table 10 軽水炉の燃料サイクルコスト

項目		コスト
燃料サイクルコスト	フロントエンド	鉱石調達、精鉱、転換 0.17 円／kWh
		濃縮 0.27 円／kWh
		再転換・成形加工 0.29 円／kWh
		0.74 円／kWh
	再処理	0.63 円／kWh
	バックエンド	中間貯蔵 0.03 円／kWh
		廃棄物処理、処分 0.25 円／kWh
		0.29 円／kWh
		1.65 円／kWh

「原子力発電の経済性について」、総合エネルギー調査会原子力部会第70回会合（資料3）、
通産省資源エネルギー庁(1999)

Table 11 燃料サイクルコスト評価のための計算条件

炉心主要諸元			
熱出力			600 MWt
平均取出燃焼度			112 GWd/t
サイクル長さ			24 ヶ月
バッチ数			2 バッチ
装荷燃料ブロック数			720 ブロック
ウランインベントリ			7.69 ton-U
初期濃縮度			14 wt%
熱効率			45.8 %
稼働率			90 %
取出 U 重量			6.26 ton-U
取出 Pu 重量			181.4 kg-Pu
Pu/Pu 割合(取出 Pu)			75.3 %
コスト単価		リード / ラグ タイム(年)	ロス率(%)
ウラン採鉱・製鍊		-2.0	
転換		-1.5	0.5
濃縮		-1.0	
再転換・成型加工		-0.5	1.0
中間貯蔵		5.0	
再処理		6.0	2.0
廃棄物処分		56.0	
その他			
劣化ウラン濃度		0.25 wt%	
金利		3.0 %	

* リードタイムは燃料装荷時点を基準とし、

ラグタイムは燃料取出時点を基準とする。

* エスカレーションは全ての項目とも 0.0 とする。

5. 今後の検討課題

GTHTR300 を対象に燃料サイクルコストの評価を行うために、GTHTR300×4 基の燃料製造を想定した燃料製造プラントの概略設計を行い、燃料製造コストを評価した。この過程で、HTTR 燃料製造での実績のない装置、処理量を想定する必要があった。今後、技術開発、製造試験等の検討を進める必要のある項目を以下に示す。

(1) 燃料製造設備の詳細設計

燃料製造コストの低減のために、HTTR 燃料製造設備を基に処理量を増加させた製造設備の設計を行った。この製造設備は、概略設計であることから、より現実に近いモデルによる臨界安全性評価を行うこと等、設備の詳細設計が必要である。また、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」(平成 12 年 9 月 25 日、原子力安全委員会決定)の適合性についても具体的な対応策の検討が必要である。

なお、集中管理による燃料製造設備での燃料の製造により、人件費の更なるコスト削減の可能性がある。

(2) 燃料製造技術の開発

燃料核の焼結に連続焼結炉を選択したが、連続炉による製造の実績がないことから、製造条件等の製造技術的な確認、検討が必要である。

流動床の処理バッチサイズを約 10kg-U としたが、この規模での流動床による燃料核の被覆実績はない。従って、被覆で安定的な被覆層を得るために約 10kg-U 規模での被覆流動試験、被覆実験による被覆条件の検討が必要であり、さらに、製造設備の改良が必要な可能性も考えられる。

被覆燃料粒子の被覆層について、第 1 層の厚さを 140 μm、SiC 層の厚さを 40 μm としたが、製造実績はない。これらの被覆層を安定して形成するための被覆実験が必要である。

外周に黒鉛層を有する燃料コンパクトの金型プレスによる成型についての技術開発と量産を前提とした製造量での品質確認のための製造試験が必要である。また、ラバープレスを用いた一体型燃料の技術開発、製造試験も進める必要がある。

(3) バックエンドの検討

中間貯蔵コストの評価のために、高温ガス炉使用済燃料貯蔵を想定した貯蔵容器、施設の設計検討が必要である。

高温ガス炉使用済燃料の再処理では、前処理工程として、燃料コンパクトからの被覆燃料粒子の取出し、被覆燃料粒子からの燃料核の取出しが必要となる。前処理工程の検討とともに、高温ガス炉使用済燃料の再処理コストの評価が必要である。

さらに、高温ガス炉では照射済の黒鉛材料(燃料や反射体)が発生する。この点も考慮して、廃棄物処理・処分コストの評価を行う必要がある。

(4) コスト単価の調査

本検討において、濃縮ウランの調達に係る費用は軽水炉ベースの値を用いた。軽水炉では、濃縮度 5wt% 以下の濃縮ウランを用いているため、GTHTR300 で用いる濃縮度 14wt%

の濃縮ウランの調達先、及び単価について具体的に調査する必要がある。

また、年間 720 体の黒鉛ブロックの調達先、及び購入単価についても詳細調査が必要である。さらに、個々の材料についても、長期購入をベースとした、具体的な価格の調査が必要である。

6. まとめ

GTHTR300 を対象に、燃料製造のための原料手当から、使用済燃料の中間貯蔵までを対象に、燃料サイクルコストの評価を行った。

高温ガス炉燃料製造について、商用規模での製造実績がないことから、GTHTR300×4 基の燃料製造を想定し、年間加工量約 7.7ton-U の燃料製造プラントの概略設計を行った。このプラントについて、燃料製造建屋費、燃料製造設備費、人件費、材料及び消耗品費、再転換費の見積もりを行い、燃料製造コストを評価した。この燃料製造プラントでは、燃料核の製造において製造能力を確保するために連続焼結炉を想定したが、商用化のためには製造条件等の検討が必要である。また、被覆粒子の製造において、 $140\text{ }\mu\text{m}$ の第 1 層及び $40\text{ }\mu\text{m}$ の SiC 層を安定して形成するための被覆条件の検討、 10kg-U 規模の流動床の実績がないことから被覆流動試験による被覆条件の検討が必要である。

次に、GTHTR300 の平衡サイクルを想定して、燃料サイクルコストの算出を行った。燃料サイクルのステージとして、ウラン採鉱・製錬、転換、濃縮、再転換・成形加工、中間貯蔵、再処理、廃棄物処理・処分を考慮した。このうち、燃料サイクルコスト中で占める割合の大きい項目は、濃縮と再転換・成形加工であった。検討の結果、GTHTR300 の燃料サイクルコストはウラン採鉱・製錬から中間貯蔵までを対象とすると約 1.07 円/kWh、バックエンドコストが軽水炉とほぼ同等と仮定し、再処理、廃棄物処理・処分まで含めると約 1.31 円/kWh となる見通しが得られた。

さらに、燃料の仕様が変更された場合の燃料製造コストへの影響を評価した。変更の可能性のある項目として、濃縮度 10~20wt%、被覆粒子の種類数 1~4 種類、被覆粒子第 1 層の厚さ $30\text{ }\mu\text{m}$ の変動、第 2 層~第 4 層の厚さ $10\text{ }\mu\text{m}$ の変動について検討したが、燃料製造コストへの影響は無視できるとの評価を得た。

謝 辞

本検討を行うに当たり、御指導、御助言いただいた核熱利用研究部の皆様に感謝いたします。さらに、貴重なコメントをいただいた沢和弘 HTTR 技術開発室長代理に感謝いたします。また、原子燃料工業株式会社新型炉燃料部の関連する方々に感謝いたします。

参考文献

- (1) 國富一彦、片西昌司、高田昌二、他、“高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の設計研究”、(投稿中)。
- (2) “原子力発電の経済性について”、総合エネルギー調査会原子力部会第 70 回会合（資料 3）、通産省資源エネルギー庁(1999)。
- (3) 沢和弘、藤川正剛、吉牟田秀治、他、JAERI-Research 2001-034、“高温工学試験研究炉燃料の貯蔵及び再処理技術の検討”、(2001)。
- (4) 高橋昌史、植田祥平、安田淳、他、JAERI-Tech 2001-091、“高温工学試験研究炉用被覆燃料粒子製造工程の改良(臨界安全対策)”、(2002)。
- (5) JAERI 1340、“臨界安全ハンドブック第 2 版”、(1999)。
- (6) “軽水炉及び高速増殖炉の経済性評価”、資料 No. 8711360、(株)日本原子力情報センター。
- (7) “THE ECONOMICS OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE”，OECD/NEA (1994)。
- (8) 電中研レビューNo. 40、“原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて”、電力中央研究所(2000)。

付録 1 燃料製造設備の臨界安全性について

想定している GTHTR300 燃料の燃料製造プラントにおいて、燃料製造設備のサイズを臨界安全ハンドブック第 2 版⁽⁵⁾、及びモンテカルロ計算コードによる臨界計算により検討した。

臨界計算はモンテカルロ計算コード KENO-Va(SCALE4 システム)を用いて行った。臨界計算の簡略化のために考慮した仮定を以下に示す。

- ・核燃料物質として設備ごとにウランまたはウラン化合物を考慮した。
 - U : ADU 生成装置(沈殿槽)
 - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$: ADU 生成装置(溶解槽)
 - UO_3 : 焙焼炉
 - UO_2 : 焼結炉、オーバーコート装置、燃料コンパクト成型装置、予備焼成炉、真空焼成炉、燃料コンパクトウラン量測定装置
- ・ウラン濃縮度を 15%とした。
- ・共存する物質として水のみ考慮した。(黒鉛等の物質は考慮していない。)
- ・核燃料物質と水は均質とした。(非均質性は考慮していない。)
- ・核燃料物質及び水の密度をパラメータとした。
- ・計算体系は、円筒、及び平板体系とし、約 30cm の水反射体を仮定した。
- ・未臨界制限は、 $k_{\text{eff}} + 3\sigma < 0.95$ とした。

対象とした設備を以下に示す。番号は「3.2 燃料製造プラントの検討、(2)製造設備数」に示したものに対応している。なお、①流動床は、臨界安全ハンドブック第 2 版⁽⁵⁾に基づき設備のサイズを検討したが、それ以外の設備は臨界計算に基づく。

- ① 流動床
- ② ADU 粒子生成装置 (溶解槽、沈殿槽)
- ③ 焙焼炉
- ④ 焼結炉
- ⑤ オーバーコート装置
- ⑥ 燃料コンパクト成型装置
- ⑦ 予備焼成炉
- ⑧ 真空焼成炉
- ⑨ 燃料コンパクトウラン量測定装置

(1) 流動床

臨界安全ハンドブック第2版⁽⁵⁾より、「表4.1 水反射体付き UO₂-H₂O の最小推定臨界値及び最小推定臨界下限値」を以下に示す。

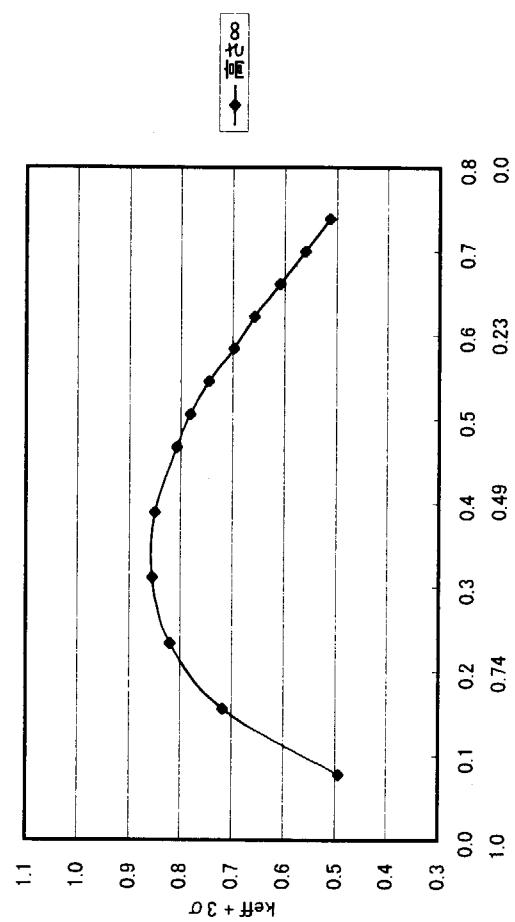
濃縮度 [wt%]	質量[kgU]		球体積[l]		円柱直径[cm]		平板厚さ[cm]	
	臨界値	下限値	臨界値	下限値	臨界値	下限値	臨界値	下限値
3	92.2	84.2	50.0	45.8	31.8	30.5	16.1	15.0
4	56.8	50.1	34.4	30.3	28.0	27.0	13.5	12.7
5	38.2	34.1	28.1	24.8	25.5	24.6	12.0	11.3
10	14.0	12.7	15.8	14.6	20.7	19.8	8.8	8.3
20	7.43	7.00	11.5	10.5	17.9	17.4	7.1	6.7

②-1 ADU生成装置(溶解槽)

計算条件 (UO₂(NO₃)₂-H₂O当量)

U密度	0.47 g/cc
U/ヨウ素比	0.604
水密度	0.9982 g/cm ³

(20℃の値)

上段: UO₂(NO₃)₂密度(g/cm³)、下段: 水密度(g/cm³)

臨界計算結果 (keff + 3σ) 円筒体系(直径30cm、高さ∞)

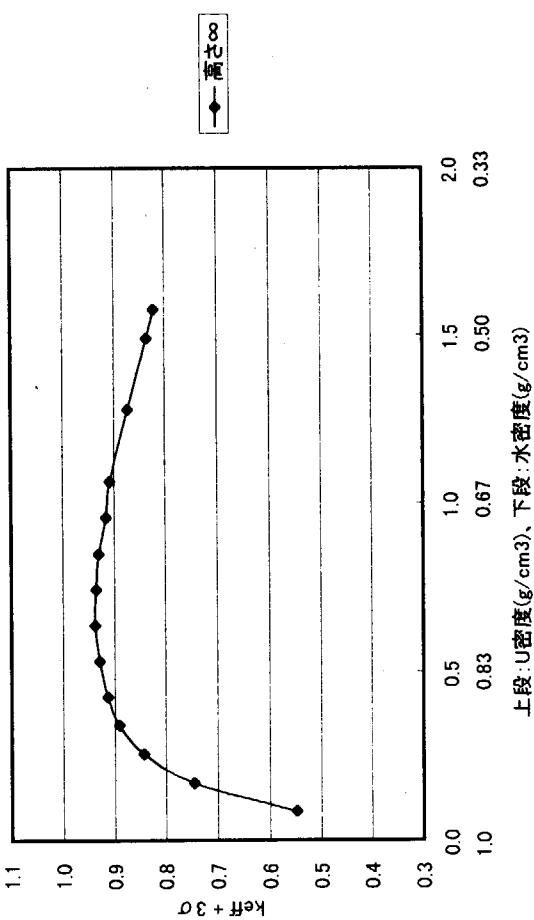
No.	U密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	0.739	0.050
2	0.700	0.100
3	0.661	0.150
4	0.623	0.200
5	0.584	0.250
6	0.545	0.299
7	0.506	0.349
8	0.467	0.399
9	0.389	0.499
10	0.311	0.599
11	0.233	0.699
12	0.156	0.799
13	0.078	0.898

(2)-2 ADU生成装置(沈殿槽)

計算条件 (U-H₂O均質)

ADU密度	3.0 g/cc
U/ADU比	0.71
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	74 % (面心立方)

No.	体積率 (Y)	U密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	74	1.576	0.474
2	70	1.491	0.502
3	60	1.278	0.573
4	50	1.065	0.644
5	45	0.959	0.679
6	40	0.852	0.715
7	35	0.746	0.750
8	30	0.639	0.786
9	25	0.533	0.821
10	20	0.426	0.856
11	16	0.341	0.885
12	12	0.256	0.913
13	8	0.170	0.942
14	4	0.085	0.970

上段:U密度(g/cm³)、下段:水密度(g/cm³)

臨界計算結果 (keff + 3σ) 円筒体系(直径20cm、高さ∞)

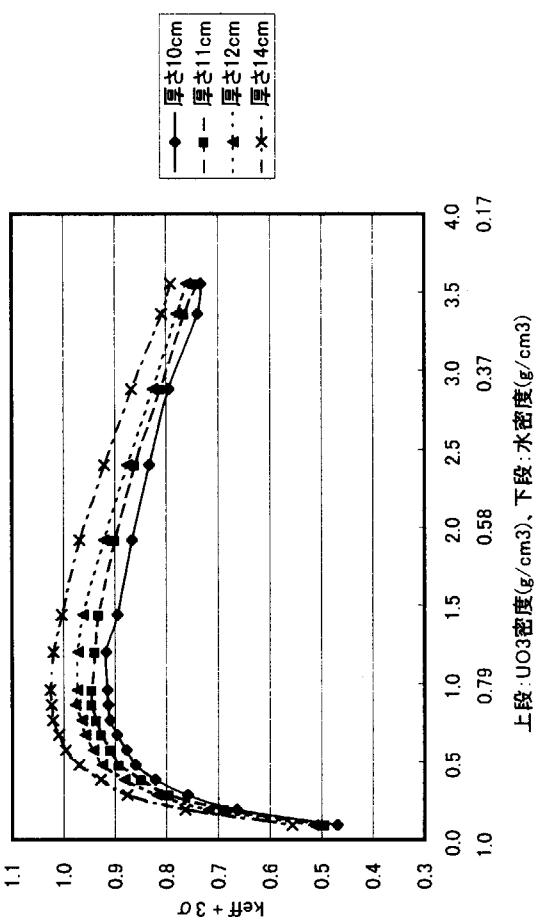
No.	うねり密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	1.516	0.414
2	1.491	0.502
3	1.278	0.573
4	1.065	0.644
5	0.959	0.695
6	0.852	0.715
7	0.746	0.750
8	0.639	0.786
9	0.533	0.821
10	0.426	0.856
11	0.341	0.885
12	0.256	0.913
13	0.170	0.942
14	0.085	0.970

③ 烧成炉

計算条件 (UO₃-H₂O均質)

UO ₃ 密度	4.8 g/cc
U/UO ₃ 比	0.83
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	74 %

No.	体積率 (%)	UO ₃ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	74	3.552	0.260
2	70	3.360	0.299
3	60	2.880	0.389
4	50	2.400	0.499
5	40	1.920	0.599
6	30	1.440	0.699
7	25	1.200	0.749
8	20	0.960	0.799
9	18	0.864	0.819
10	16	0.768	0.838
11	14	0.672	0.858
12	12	0.516	0.878
13	10	0.480	0.898
14	8	0.384	0.918
15	6	0.288	0.938
16	4	0.192	0.958
17	2	0.096	0.978

臨界計算結果 ($k_{eff} + 3\sigma$) 平板体系(幅30cm、長さ∞、厚さ: パラメータ)

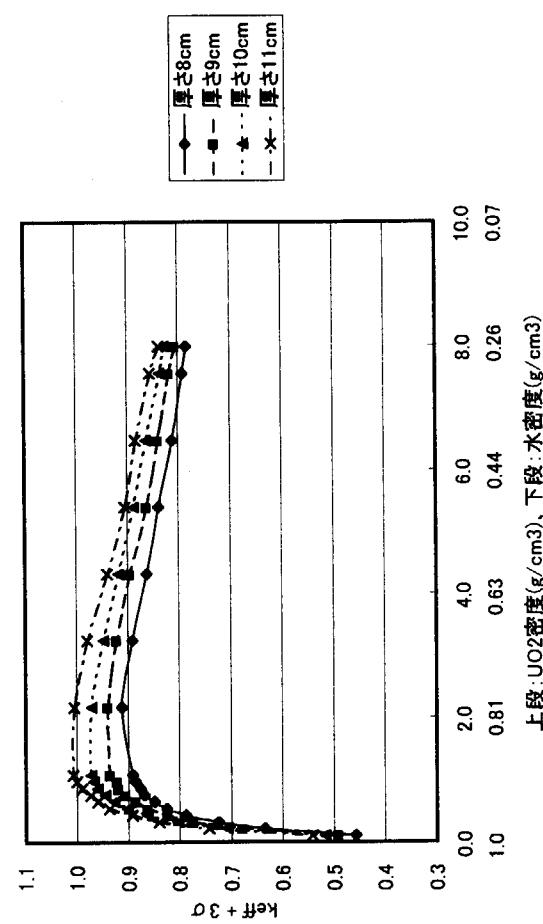
No.	UO ₃ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³	平板厚さ(cm)
1	3.552	0.696	0.714
2	3.360	0.299	0.710
3	2.880	0.399	0.752
4	2.400	0.499	0.780
5	1.920	0.599	0.815
6	1.440	0.699	0.836
7	1.200	0.740	0.840
8	0.960	0.799	0.846
9	0.864	0.819	0.837
10	0.768	0.838	0.828
11	0.672	0.858	0.821
12	0.576	0.878	0.800
13	0.480	0.898	0.780
14	0.384	0.918	0.744
15	0.288	0.938	0.666
16	0.192	0.958	0.589
17	0.096	0.978	0.411

④ 焼結炉

計算条件 (UO₂-H₂O均質)

UO ₂ 密度	10.8 g/cc
U/UO ₂ 比	0.881
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	74 % (面心立方)

No.	体積率 (%)	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	74	7.992	0.260
2	70	7.560	0.299
3	60	6.480	0.399
4	50	5.400	0.499
5	40	4.320	0.599
6	30	3.240	0.699
7	20	2.160	0.799
8	10	1.080	0.898
9	9	0.972	0.908
10	8	0.864	0.918
11	7	0.756	0.928
12	6	0.648	0.938
13	5	0.540	0.948
14	4	0.432	0.958
15	3	0.324	0.968
16	2	0.216	0.978
17	1	0.108	0.988

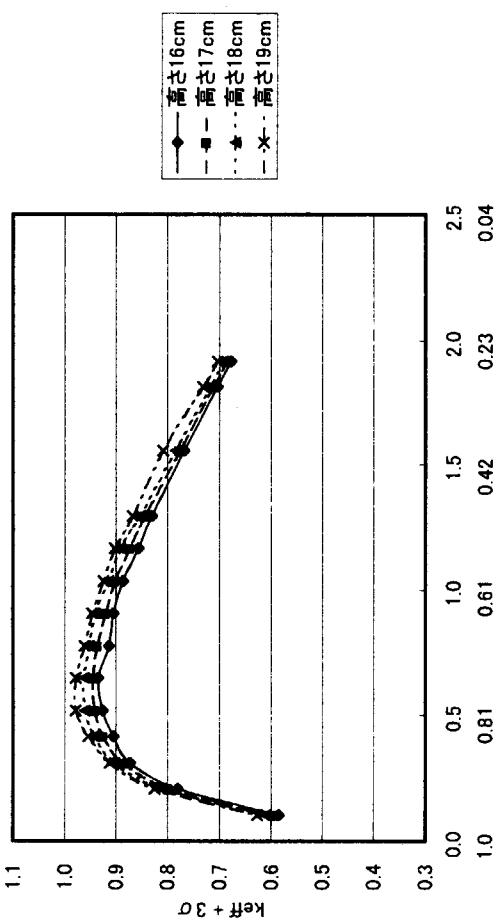
境界計算結果 (k_{eff} + 3σ) 平板体系(幅30cm、長さ∞、厚さ : パラメータ)

No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³	平板厚さ(cm)
1	7.992	0.260	0.36
2	7.560	0.299	0.745
3	6.480	0.399	0.758
4	5.400	0.499	0.747
5	4.320	0.599	0.763
6	3.240	0.699	0.775
7	2.160	0.799	0.774
8	1.080	0.898	0.747
9	0.972	0.908	0.735
10	0.864	0.918	0.725
11	0.756	0.928	0.713
12	0.648	0.938	0.692
13	0.540	0.948	0.664
14	0.432	0.958	0.631
15	0.324	0.968	0.575
16	0.216	0.978	0.492
17	0.108	0.988	0.340

⑤ オーバーコート装置

計算条件 (UO₂-H₂O均質)

UO ₂ 密度	2.59 g/cc
U/O比	0.881
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	74 % (面心立方)



臨界計算結果 ($k_{eff} + 3\sigma$) 円筒体系(直径40cm、高さ: パラメータ)

No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³	円筒高さ(cm)
1	1.918	0.260	0.664
2	1.814	0.299	0.685
3	1.555	0.399	0.691
4	1.296	0.748	0.704
5	1.166	0.755	0.768
6	1.037	0.864	0.822
7	0.907	0.864	0.830
8	0.778	0.882	0.840
9	0.648	0.894	0.857
10	0.518	0.799	0.848
11	0.415	0.838	0.848
12	0.311	0.878	0.886
13	0.207	0.918	0.898
14	0.104	0.958	0.904

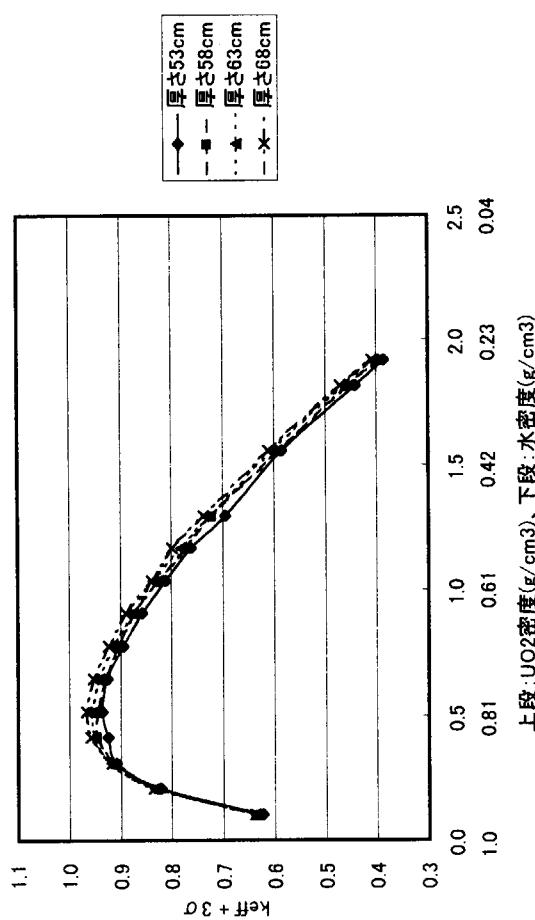
上段:UO₂密度(g/cm³)、下段:水密度(g/cm³)

⑥ 燃料コンパクト成型装置

計算条件 (UO₂-H₂O均質)

No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	H ₂ O密度 g/cm ³	(20°Cの値) (面心立方)
1	2.59	0.881	
2	0.9982	0.9982	
3	74	74	

No.	体積率 (%)	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	74	1.918	0.260
2	70	1.814	0.299
3	60	1.555	0.399
4	50	1.295	0.499
5	45	1.166	0.549
6	40	1.037	0.599
7	35	0.907	0.649
8	30	0.778	0.699
9	25	0.648	0.749
10	20	0.518	0.799
11	16	0.415	0.838
12	12	0.311	0.878
13	8	0.207	0.918
14	4	0.104	0.958

上段:UO₂密度(g/cm³)、下段:水密度(g/cm³)臨界計算結果 (k_{eff} + 3σ) 平板体系(幅20cm、長さ∞、厚さ: パラメータ)

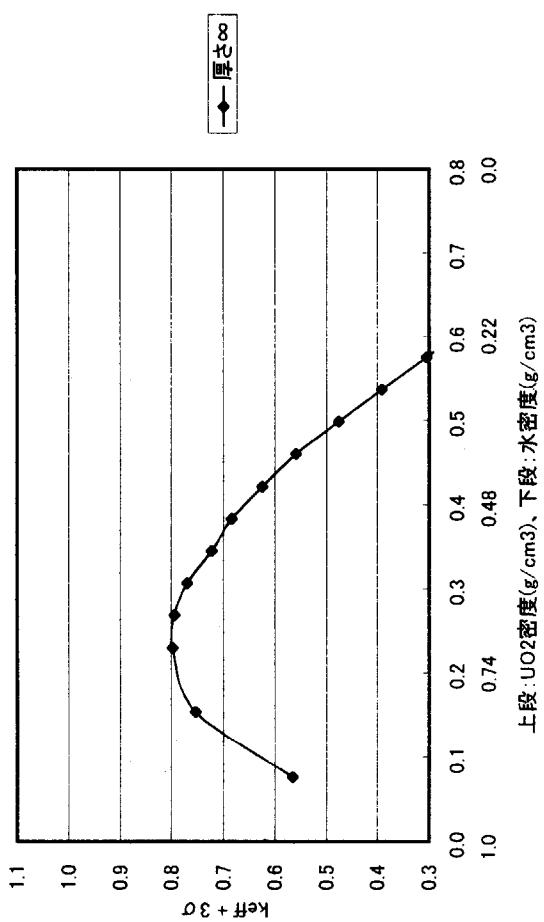
No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³	平板厚さ(cm)
1	1.918	0.260	0.398
2	1.814	0.299	0.452
3	1.555	0.399	0.590
4	1.295	0.499	0.696
5	1.166	0.549	0.754
6	1.037	0.599	0.798
7	0.907	0.649	0.857
8	0.778	0.699	0.895
9	0.648	0.749	0.912
10	0.518	0.799	0.929
11	0.415	0.838	0.926
12	0.311	0.878	0.907
13	0.207	0.918	0.825
14	0.104	0.958	0.624

⑦ 予備焼成炉、
⑧ 真空焼成炉

計算条件 (UO₂-H₂O当量)

UO ₂ 密度	0.767 g/cc
U/UO ₂ 比	0.881
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	30 %

(20°Cの値)			
No.	体積率 (%)	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	95	0.728	0.050
2	90	0.690	0.100
3	85	0.652	0.150
4	80	0.613	0.200
5	75	0.575	0.250
6	70	0.537	0.299
7	65	0.498	0.349
8	60	0.460	0.399
9	55	0.422	0.449
10	50	0.383	0.499
11	45	0.345	0.549
12	40	0.307	0.599
13	35	0.268	0.649
14	30	0.230	0.699
15	20	0.153	0.799
16	10	0.077	0.898

上段: UO₂密度(g/cm³)、下段: 水密度(g/cm³)臨界計算結果 ($k_{eff} + 3\sigma$) 平板体系(幅20cm、長さ∞、厚さ∞)

No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	0.728	0.055
2	0.690	0.092
3	0.652	0.149
4	0.613	0.223
5	0.575	0.304
6	0.537	0.392
7	0.498	0.476
8	0.460	0.558
9	0.422	0.624
10	0.383	0.684
11	0.345	0.722
12	0.307	0.769
13	0.268	0.794
14	0.230	0.798
15	0.153	0.754
16	0.077	0.565

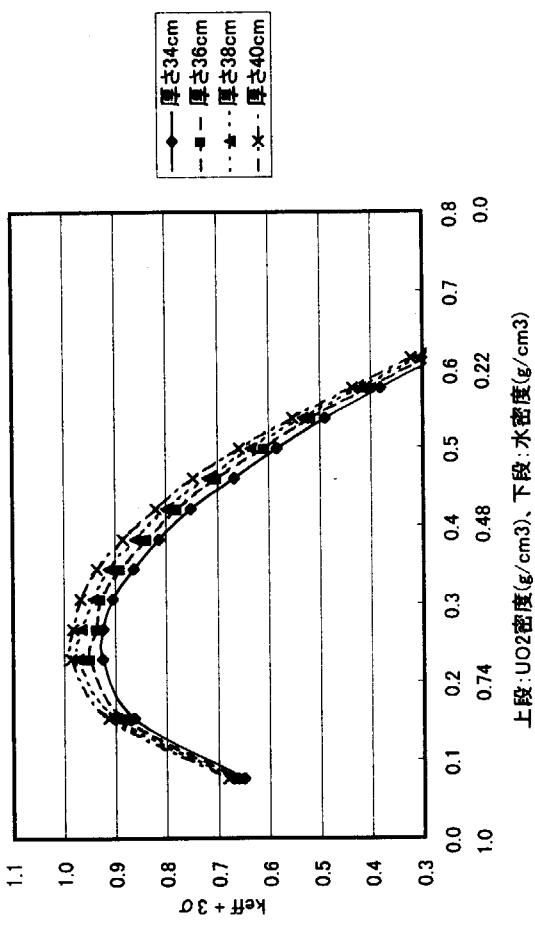
(9) 燃料コンパクトウラン量測定装置

計算条件 (UO₂-H₂O均質)

UO ₂ 密度	0.767 g/cc
U/UO ₂ 比	0.881
水密度	0.9982 g/cm ³
充填率	30 %

No.	体積率 (%)	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³
1	100	0.767	0.000
2	95	0.728	0.050
3	90	0.690	0.100
4	85	0.652	0.150
5	80	0.613	0.200
6	75	0.575	0.250
7	70	0.537	0.299
8	65	0.498	0.349
9	60	0.460	0.399
10	55	0.422	0.449
11	50	0.383	0.499
12	45	0.345	0.549
13	40	0.307	0.599
14	35	0.268	0.649
15	30	0.230	0.699
16	20	0.153	0.799
17	10	0.077	0.898

1.1

上段: UO₂密度(g/cm³)、下段: 水密度(g/cm³)

臨界計算結果 (keff + 3σ) 平板体系(幅40cm、長さ∞、厚さ : パラメータ)

No.	UO ₂ 密度 g/cm ³	水密度 g/cm ³	平板厚さ(cm)										
			32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0	40.0	41.0	42.0
1	0.767	0.000	0.053	0.054	0.054	0.055	0.056	0.056	0.058	0.059	0.059	0.059	0.060
2	0.728	0.050	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.066	0.066	0.068	0.069	0.070	0.071
3	0.690	0.100	0.098	0.100	0.106	0.108	0.110	0.115	0.116	0.121	0.122	0.126	0.126
4	0.652	0.150	0.165	0.172	0.176	0.181	0.189	0.193	0.201	0.206	0.211	0.217	0.220
5	0.613	0.200	0.258	0.264	0.271	0.277	0.292	0.290	0.303	0.314	0.322	0.333	0.340
6	0.575	0.250	0.363	0.372	0.381	0.392	0.402	0.412	0.420	0.432	0.446	0.453	0.453
7	0.537	0.299	0.460	0.477	0.489	0.501	0.516	0.523	0.532	0.547	0.553	0.560	0.573
8	0.498	0.349	0.555	0.575	0.584	0.599	0.610	0.630	0.636	0.653	0.658	0.670	0.678
9	0.460	0.399	0.642	0.662	0.668	0.680	0.701	0.713	0.720	0.735	0.747	0.756	0.765
10	0.422	0.449	0.721	0.733	0.752	0.765	0.778	0.788	0.801	0.808	0.820	0.835	0.838
11	0.383	0.499	0.789	0.800	0.814	0.825	0.837	0.854	0.861	0.869	0.885	0.892	0.905
12	0.345	0.549	0.841	0.849	0.864	0.883	0.889	0.902	0.914	0.923	0.935	0.941	0.952
13	0.307	0.599	0.875	0.892	0.905	0.911	0.928	0.940	0.942	0.954	0.968	0.973	0.979
14	0.268	0.649	0.902	0.915	0.923	0.934	0.937	0.953	0.966	0.975	0.993	0.991	1.001
15	0.230	0.699	0.909	0.910	0.924	0.940	0.949	0.957	0.972	0.979	0.996	0.997	0.995
16	0.153	0.799	0.849	0.856	0.864	0.883	0.897	0.907	0.913	0.921	0.925	0.931	0.935
17	0.077	0.898	0.633	0.641	0.650	0.653	0.665	0.672	0.674	0.681	0.686	0.690	0.695

付録 2 燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価の算出

通産省資源エネルギー庁は、総合エネルギー調査会原子力部会第70回会合⁽²⁾で、原子力発電(軽水炉)による発電原価の試算結果を発表した。これによると、軽水炉の燃料サイクルコスト(燃料費)は1.65円/kWhと試算されている。内訳はTable 10に示したとおりである。この軽水炉の燃料サイクルの経済性評価を基に、OECD/NEAの報告書⁽⁷⁾に記載されている均等化核燃料サイクルコストの計算方法に基づき、コスト単価を想定した。均等化核燃料サイクルコストの計算方法については、本文4.1章に示したとおりである。なお、資源エネルギー庁の試算⁽²⁾ではモデルプラントの諸元としてBWR、PWRそれぞれの濃縮度が示されているため、BWR、PWRそれぞれのコスト単価を評価し、両者の平均をガス炉の燃料サイクルコスト評価に用いることとする。

1. BWRのコスト単価の算出

BWRのモデルプラントとしてABWR(柏崎刈羽6/7号炉)を想定する。また、サイクル長さとして、13ヶ月運転を仮定する。コスト単価算出のための計算条件をTable A-1に示す。

(1)現在価値換算された発生電力量(B)

$$B(\text{kWh}) = E_b \times R_c$$

E_b : バッチ当たりの発生電力(kWh)

$$= E_d \times 1.0E+6 \times 24 \times W_d \times E_f / 100$$

E_d : バッチ平均取出燃焼度(GWd/t)

W_d : バッチU重量(ton-U)

E_f : 熱効率(%)

R_c : 連続割引による現在価値換算係数

$$= \{1 - \exp(-r' \times tr)\} / \{r' \times tr\}$$

$r' = \ln(1+r)$ 、 r : 現在価値換算率(fraction)

tr : 炉内滞在期間(年)

=サイクル長さ(年) × バッチ数 / 稼働率(fraction)

13ヶ月運転を仮定すると、サイクル燃焼度(E_c)は次のようになる。

$$E_c = \text{熱出力}(3926\text{MWt}) \times 365 \text{日} \times 13 \text{ヶ月} / 12 \text{ヶ月} / \text{炉心U重量}(150000\text{kg-U})$$

$$= 10.36\text{GWd/t}$$

よって、バッチ数 = $E_d(45.0\text{GWd/t}) / E_c(10.36\text{GWd/t}) = 4.35$ バッチとなり、バッチU重量は、 $W_d = \text{炉心U重量}(150\text{ton-U}) / 4.35 \text{バッチ} = 34.52\text{ton-U}$ となる。従って、バッチ当たりの発生電力は、次のようにになる。

$$E_b = E_d(45.0\text{GWd/t}) \times 1.0E+6 \times 24 \times W_d(34.52\text{ton-U}) \times E_f(34.5\%) / 100$$

$$= 1.286 \times 10^{10}\text{kWh}$$

一方、炉内滞在期間は、 $tr = 13/12 \text{年} \times 4.35 \text{バッチ} / 0.8 \text{稼働率} = 5.88 \text{年}$ となり、連続割引による現在価値換算係数は次のようになる。

$$R_c = \{1 - \exp(-r' \times tr)\} / \{r' \times tr\} = 0.918$$

ここで、 $r' = \ln(1+r) = \ln(1+0.03) = 0.0296$ 。

従って、現在価値換算された発生電力量は、

$$B = Eb \times R_c = 1.286 \times 10^{10} \text{ kWh} \times 0.918 = 1.181 \times 10^{10} \text{ kWh}$$

となる。

(2) 現在価値換算された全コスト(A)

Aについては、各燃料サイクルコスト項目ごとに取替燃料バッチあたりの発生費用を算出し、それに対してエスカレーションと現在価値換算率を考慮し、以下のように積算する。

$$A (\text{円}) = \sum [M_i \times P_i \times (1+s_i)^{t_c - t_b + t_i} \times \{1/(1+r)\}^{t_i}]$$

M_i : 重量 (kg)

P_i : 単価 (円 /kg)

s_i : エスカレーション (fraction /年)

r_i : 現在価値換算率(金利) (fraction /年)

t_b : 貨幣価値の基準年

t_c : 燃料装荷年

t_i : リードタイム／ラグタイム (年)

I	1	2	3	4	5
項目	ウラン購入	転換	濃縮	成型加工	中間貯蔵
	6	7			
	再処理	廃棄物処分			

なお、資源エネ庁の試算⁽²⁾では、ウラン購入+転換の値が示されているため、ウラン購入単価と転換単価の比をOECD/NEAの報告書⁽⁷⁾を参考に50:8と仮定して評価を行った。

①ウラン購入

$$F_1 = M_1 \times P_1 \times R_1$$

F_1 : ウラン購入費

M_1 : 所要天然ウラン量

P_1 : ウラン購入単価

R_1 : 現在価値換算係数

所要天然ウラン量は次のとおりである。

$$M_1 = (1+L_2) \times (1+L_3) \times (1+L_4) \times (\varepsilon_p - \varepsilon_t) / (\varepsilon_f - \varepsilon_t) \times M_4$$

L_i : ロス率、 ε : 濃縮度 (wt%、p:EU、f:NU、t:DU)

$$= 1.005 \times 1.0 \times 1.01 \times (3.8\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%}) / (0.711\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%})$$

$$\times 34.52\text{ton-U} \times 1000$$

$$= 2.698 \times 10^5 \text{kg-U}$$

また、現在価値換算係数は次の式のようになる。

$$R_1 = (1+s_1)^{t_c - t_b + t_l} \times \{1/(1+r)\}^{t_l}$$

$$= (1+0.012)^{2000-1991+(-2.0)} \times \{1/(1+0.03)\}^{-2.0} = 1.153$$

ここで、ウラン購入の燃料サイクルコストは、 $C_1 = R_1 / (R_1 + R_2 \times 8/50) \times 0.17$ 円/kWh

= 0.148 円/kWh であることから、ウラン購入単価は次のようになる。

$$\begin{aligned} P1 &= C1 \times B / (M1 \times R1) \\ &= 0.148 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.698 \times 10^5 \text{kg U} \times 1.153) / 10^4 \\ &= 0.563 \text{ 万円/kg-U} \end{aligned}$$

なお、ガス炉の燃料サイクルコスト計算では、エスカレーション=0.0 とするため、装荷時点(2000年)の値を単価として用いることとする。

$$\begin{aligned} P1(2000 \text{ 年}) &= P1(1991 \text{ 年}) \times (1 + 0.012)^{2000 - 1991 + (-2.0)} \\ &= 0.563 \text{ 万円/kg-U} \times 1.087 = 0.61 \text{ 万円/kg-U} \end{aligned}$$

(2) 転換

$$F2 = M2 \times P2 \times R2$$

所要天然ウラン量は、①と同じであり、 $M2 = M1 = 2.698 \times 10^5 \text{kg U}$ となる。また、現在価値換算係数は、

$$R2 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + (-1.5)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-1.5} = 1.045$$

である。ここで、転換の燃料サイクルコストは、 $C2 = R2 \times 8/50 / (R1 + R2 \times 8/50) \times 0.17$ 円/kWh = 0.022 円/kWh であることから、転換単価は次のようにになる。

$$\begin{aligned} P2 &= C2 \times B / (M2 \times R2) \\ &= 0.022 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.698 \times 10^5 \text{kg-U} \times 1.045) / 10^4 \\ &= 0.09 \text{ 万円/kg-U} \end{aligned}$$

(3) 濃縮

$$F3 = M3 \times SWU \times P3 \times R3$$

$M3$: 所要濃縮ウラン量

SWU : 分離作業単位

所要濃縮ウラン量は次のとおりである。

$$\begin{aligned} M3 &= (1 + L3) \times (1 + L4) \times M4 = 1.0 \times 1.01 \times 34.52 \text{ton-U} \times 1000 \\ &= 3.487 \times 10^4 \text{kg-U} \end{aligned}$$

分離作業単位は次の式のとおりである。

$$\begin{aligned} SWU &= Mp \times Vp + Mt \times Vt - Mf \times Vf \\ Vn &= (2 \times \varepsilon n - 1) \times \ln \{ \varepsilon n / (1 - \varepsilon n) \}, n : p, f, t \\ Mp &= 1.0, Mt = Mf - Mp, Mf = Mp \times (\varepsilon p - \varepsilon t) / (\varepsilon f - \varepsilon t) \end{aligned}$$

従って、

$$\begin{aligned} SWU &= 1.0 \times 2.986 + (7.701 - 1.0) \times 5.959 - 7.701 \times 4.869 \\ &= 5.422 \text{kg-SWU} \end{aligned}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$R3 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + (-1.0)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-1.0} = 1.030$$

である。ここで、濃縮の燃料サイクルコストは、 $C3 = 0.27$ 円/kWh であることから、濃縮単価は次のようにになる。

$$\begin{aligned}
 P3 &= C3 \times B / (M3 \times R3) \\
 &= 0.27 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} \\
 &\quad / (3.487 \times 10^4 \text{kg U} \times 5.422 \text{kg-SWU} \times 1.030) \times 10^4 \\
 &= 1.64 \text{ 万円/kg-U}
 \end{aligned}$$

(4)成形加工

$$F4 = M4 \times P4 \times R4$$

所要濃縮ウラン量は、

$$\begin{aligned}
 M4 &= (1 + L4) \times M4 = 1.01 \times 34.52 \text{ton-U} \times 1000 = 3.487 \times 10^4 \text{kg U} \\
 \text{となる。また、現在価値換算係数は} \\
 R4 &= (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + (-0.5)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-0.5} = 1.015
 \end{aligned}$$

である。ここで、成型加工の燃料サイクルコストは、C4=0.29 円/kWh であることから、成型加工単価は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 P4 &= C4 \times B / (M4 \times R4) \\
 &= 0.29 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (3.487 \times 10^4 \text{kg-U} \times 1.015) \times 10^4 \\
 &= 9.68 \text{ 万円/kg-U}
 \end{aligned}$$

(5)中間貯蔵

$$F5 = M5 \times P5 \times R5$$

M5：取出重金属量

取出重金属量は、

$$\begin{aligned}
 M5 &= (\text{取出 U 重量} + \text{取出 Pu 重量}) / \text{バッチ数} \\
 &= (1.414 \times 10^5 \text{kg-U} + 1.449 \times 10^3 \text{kg-Pu}) / 4.35 \text{ バッチ} \\
 &= 3.288 \times 10^4 \text{kg-HM}
 \end{aligned}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$\begin{aligned}
 R5 &= (1 + s5)^{tc - tb + t5 + tr} \times \{1 / (1 + r)\}^{(t5 + tr)} \\
 &= (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + 5.0 + 5.88} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(5.0 + 5.88)} = 0.725
 \end{aligned}$$

である。ここで、中間貯蔵の燃料サイクルコストは、C5=0.03 円/kWh であることから、中間貯蔵単価は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 P5 &= C5 \times B / (M5 \times R5) \\
 &= 0.03 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (3.288 \times 10^4 \text{kg-HM} \times 0.725) \times 10^4 \\
 &= 1.49 \text{ 万円/kg-HM}
 \end{aligned}$$

(6)再処理

$$F6 = M6 \times P6 \times R6$$

取出重金属量は、(5)と同じであり、M6=M5=3.288×10⁴kg-HM となる。また、現在価値換算係数は、

$$R6 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + 6.0 + 5.88} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(6.0 + 5.88)} = 0.704$$

である。ここで、再処理の燃料サイクルコストは、 $C_6 = 0.63 \text{ 円/kWh}$ であることから、再処理単価は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_6 &= C_6 \times B / (M_6 \times R_6) \\ &= 0.63 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (3.288 \times 10^4 \text{kg HM} \times 0.704) / 10^4 \\ &= 32.15 \text{ 万円/kg HM} \end{aligned}$$

(7) 廃棄物処分

$$F_7 = M_7 \times P_7 \times R_7$$

取出重金属量は、(5)と同じであり、 $M_7 = M_5 = 3.288 \times 10^4 \text{kg HM}$ となる。また、現在価値換算係数は、

$$R_7 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + 56.0 + 5.88} \times [1 / (1 + 0.03)]^{(56.0 + 5.88)} = 0.161$$

である。ここで、廃棄物処分の燃料サイクルコストは、 $C_7 = 0.25 \text{ 円/kWh}$ であることから、廃棄物処分単価は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_7 &= C_7 \times B / (M_7 \times R_7) \\ &= 0.25 \text{ 円/kWh} \times 1.181 \times 10^{10} \text{kWh} / (3.288 \times 10^4 \text{kg HM} \times 0.161) / 10^4 \\ &= 55.92 \text{ 万円/kg HM} \end{aligned}$$

(3) コスト単価

上記により求められたBWRのコスト単価を以下に示す。

項目	コスト単価
(1) ウラン購入	0.61 万円/kg-U
(2) 転換	0.09 万円/kg-U
(3) 濃縮	1.64 万円/kg SWU
(4) 成形加工	9.68 万円/kg-U
(5) 中間貯蔵	1.49 万円/kg-HM
(6) 再処理	32.15 万円/kg-HM
(7) 廃棄物処分	55.92 万円/kg-HM

2. PWR のコスト単価の算出

PWRのモデルプラントとして大飯3/4号炉を想定する。また、取替えバッチとして、3バッチ取替えを仮定する。コスト単価算出のための計算条件をTable A-2に示す。

(1) 現在価値換算された発生電力量(B)

$$B(\text{kWh}) = E_b \times R_c$$

バッチU重量は、 $W_d = \text{炉心U重量}(86\text{ton-U}) / 3\text{バッチ} = 28.67\text{ton-U}$ となる。従って、バッチ当たりの発生電力は、次のようになる。

$$\begin{aligned} E_b &= Ed(45.0\text{GWd/t}) \times 1.0E+6 \times 24 \times W_d(28.67\text{ton U}) \times Ef(34.5\%) / 100 \\ &= 1.068 \times 10^{10} \text{kWh} \end{aligned}$$

一方、サイクル長さ(Lc)は、

$$L_c = 45000 \text{MWd/t} / 3 \text{バッチ} \times 86 \text{ton U} \times 12 \text{ヶ月} / 3423 \text{MWh} / 365 \text{日} \\ = 12.38 \text{ヶ月}$$

である。よって、炉内滞在期間は、 $tr = 12.38 / 12 \text{年} \times 3 \text{バッチ} / 0.8 \text{稼働率} = 3.87 \text{年}$ となり、連続割引による現在価値換算係数は次のようになる。

$$R_c = \{1 - \exp(-r' \times tr)\} / \{r' \times tr\} = 0.945$$

$$\text{ここで、} r' = \ln(1+r) = \ln(1+0.03) = 0.0296.$$

従って、現在価値換算された発生電力量は、

$$B = E_b \times R_c = 1.068 \times 10^{10} \text{kWh} \times 0.945 = 1.009 \times 10^{10} \text{kWh}$$

となる。

(2) 現在価値換算された全コスト(A)

① ウラン購入

$$F_1 = M_1 \times P_1 \times R_1$$

所要天然ウラン量は次のとおりである。

$$M_1 = (1 + L_2) \times (1 + L_3) \times (1 + L_4) \times (\varepsilon_p - \varepsilon_t) / (\varepsilon_f - \varepsilon_t) \times M_4 \\ L_i : ロス率、\varepsilon : 濃縮度 (wt%、p : EU、f : NU、t : DU) \\ = 1.005 \times 1.0 \times 1.01 \times (4.1\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%}) / (0.711\text{wt\%} - 0.25\text{wt\%}) \\ \times 28.67 \text{ton-U} \times 1000 \\ = 2.430 \times 10^5 \text{kg-U}$$

また、現在価値換算係数は次の式のようになる。

$$R_1 = (1 + 0.012)^{2000-1991+(-2.0)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-2.0} = 1.153$$

ここで、ウラン購入の燃料サイクルコストは、 $C_1 = R_1 / (R_1 + R_2 \times 8/50) \times 0.17 \text{円/kWh} = 0.148 \text{円/kWh}$ であることから、ウラン購入単価は次のようになる。

$$P_1 = 0.148 \text{円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.430 \times 10^5 \text{kg-U} \times 1.153) / 10^4 \\ = 0.535 \text{万円/kg-U}$$

なお、ガス炉の燃料サイクルコスト計算では、エスカレーション=0.0 とするため、装荷時点(2000年)の値を単価として用いることとする。

$$P_1(2000 \text{年}) = P_1(1991 \text{年}) \times (1 + 0.012)^{2000-1991+(-2.0)} \\ = 0.535 \text{万円/kg-U} \times 1.087 = 0.58 \text{万円/kg-U}$$

(2) 転換

$$F_2 = M_2 \times P_2 \times R_2$$

所要天然ウラン量は、①と同じであり、 $M_2 = M_1 = 2.430 \times 10^5 \text{kg-U}$ となる。また、現在価値換算係数は、

$$R_2 = (1 + 0.0)^{2000-1991+(-1.5)} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{-1.5} = 1.045$$

である。ここで、転換の燃料サイクルコストは、 $C_2 = R_2 \times 8/50 / (R_1 + R_2 \times 8/50) \times 0.17 \text{円/kWh} = 0.022 \text{円/kWh}$ であることから、転換単価は次のようになる。

$$P_2 = 0.022 \text{円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.430 \times 10^5 \text{kg-U} \times 1.045) / 10^4$$

$$= 0.09 \text{ 万円/kg-U}$$

(3)濃縮

$$F3 = M3 \times SWU \times P3 \times R3$$

所要濃縮ウラン量は次のとおりである。

$$\begin{aligned} M3 &= (1+L3) \times (1+L4) \times M4 = 1.0 \times 1.01 \times 28.67 \text{ ton U} \times 1000 \\ &= 2.895 \times 10^4 \text{ kg-U} \end{aligned}$$

分離作業単位は、

$$\begin{aligned} SWU &= 1.0 \times 2.894 + (8.351 - 1.0) \times 5.959 - 8.351 \times 4.869 \\ &= 6.039 \text{ kg-SWU} \end{aligned}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$R3 = (1+0.0)^{2000-1991+(-1.0)} \times \{1/(1+0.03)\}^{-1.0} = 1.030$$

である。ここで、濃縮の燃料サイクルコストは、C3=0.27円/kWhであることから、濃縮単価は次のようになる。

$$\begin{aligned} P3 &= 0.27 \text{ 円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{ kWh} \\ &\quad / (2.895 \times 10^4 \text{ kg-U} \times 6.039 \text{ kg-SWU} \times 1.030) / 10^4 \\ &= 1.51 \text{ 万円/kg-U} \end{aligned}$$

(4)成形加工

$$F4 = M4 \times P4 \times R4$$

所要濃縮ウラン量は、

$$M4 = (1+L4) \times M4 = 1.01 \times 28.67 \text{ ton U} \times 1000 = 2.895 \times 10^4 \text{ kg-U}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$R4 = (1+0.0)^{2000-1991+(-0.5)} \times \{1/(1+0.03)\}^{-0.5} = 1.015$$

である。ここで、成型加工の燃料サイクルコストは、C4=0.29円/kWhであることから、成型加工単価は次のようになる。

$$\begin{aligned} P4 &= 0.29 \text{ 円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{ kWh} / (2.895 \times 10^4 \text{ kg-U} \times 1.015) / 10^4 \\ &= 9.96 \text{ 万円/kg-U} \end{aligned}$$

(5)中間貯蔵

$$F5 = M5 \times P5 \times R5$$

取出重金属量は、

$$\begin{aligned} M5 &= (8.099 \times 10^4 \text{ kg-U} + 9.107 \times 10^2 \text{ kg-Pu}) / 3 \text{ バッチ} \\ &= 2.730 \times 10^4 \text{ kg-HM} \end{aligned}$$

となる。また、現在価値換算係数は

$$R5 = (1+0.0)^{2000-1991+5.0+3.87} \times \{1/(1+0.03)\}^{(5.0+3.87)} = 0.769$$

である。ここで、中間貯蔵の燃料サイクルコストは、C5=0.03円/kWhであることから、中間貯蔵単価は次のようになる。

$$P5 = 0.03 \text{ 円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.730 \times 10^4 \text{kg HM} \times 0.769) / 10^4 \\ = 1.4 \text{ 万円/kg-HM}$$

(6)再処理

$$F6 = M6 \times P6 \times R6$$

取出重金属量は、(5)と同じであり、 $M6 = M5 = 2.730 \times 10^4 \text{kg HM}$ となる。また、現在価値換算係数は、

$$R6 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + 6.0 + 3.87} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(6.0 + 3.87)} = 0.747$$

である。ここで、再処理の燃料サイクルコストは、 $C6 = 0.63 \text{ 円/kWh}$ であることから、再処理単価は次のようになる。

$$P6 = 0.63 \text{ 円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.730 \times 10^4 \text{kg HM} \times 0.747) / 10^4 \\ = 31.18 \text{ 万円/kg-HM}$$

(7)廃棄物処分

$$F7 = M7 \times P7 \times R7$$

取出重金属量は、(5)と同じであり、 $M7 = M5 = 2.730 \times 10^4 \text{kg HM}$ となる。また、現在価値換算係数は、

$$R7 = (1 + 0.0)^{2000 - 1991 + 56.0 + 3.87} \times \{1 / (1 + 0.03)\}^{(56.0 + 3.87)} = 0.170$$

である。ここで、廃棄物処分の燃料サイクルコストは、 $C7 = 0.25 \text{ 円/kWh}$ であることから、廃棄物処分単価は次のようになる。

$$P7 = 0.25 \text{ 円/kWh} \times 1.009 \times 10^{10} \text{kWh} / (2.730 \times 10^4 \text{kg HM} \times 0.170) / 10^4 \\ = 54.24 \text{ 万円/kg-HM}$$

(3)コスト単価

上記により求められたPWRのコスト単価を以下に示す。

項目	コスト単価
① ウラン購入	0.58 万円/kg-U
② 転換	0.09 万円/kg U
③ 濃縮	1.51 万円/kg-SWU
④ 成形加工	9.96 万円/kg U
⑤ 中間貯蔵	1.44 万円/kg-HM
⑥ 再処理	31.18 万円/kg-HM
⑦ 廃棄物処分	54.24 万円/kg-HM

3. GTHTR300 の燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価の算出

GTHTR300 の燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価として、BWR、PWR それぞれで求めたコスト単価から、BWR : PWR の重みを 1 : 1 として平均した値を用いることとする。なお、成形加工、及び中間貯蔵については、ガス炉燃料向けの値を評価した。

(1) 成形加工単価

本文 3.3 章に示したとおり、燃料製造コストを 1 年当たり約 40.6 億円と評価した。一方、燃料製造プラントの処理量は 1 年当たり約 7.7 ton U である。従って、成形加工単価は、52.8 万円/kg-U となる。

(2) 中間貯蔵単価

使用済燃料の貯蔵方式は、プール貯蔵、金属キャスク貯蔵、ボールド貯蔵、サイロ貯蔵及びコンクリートキャスク貯蔵が挙げられる。軽水炉における使用済燃料の貯蔵は、コンクリートキャスク方式による貯蔵が最も経済的である⁽⁸⁾。

資源エネルギー庁の試算⁽²⁾は、軽水炉使用済燃料の金属キャスク貯蔵を想定したものであり、中間貯蔵単価は、BWR、PWR の平均から 1.46 万円/kg HM となる。電力中央研究所から報告されている水プール貯蔵に対する各貯蔵方式のコスト相対比⁽⁸⁾は、金属キャスクによる貯蔵コスト 0.23 に対してコンクリートキャスクの貯蔵コストは 0.18 である。よって、軽水炉使用済燃料のコンクリートキャスク貯蔵の単価は、 $1.46 \text{ 万円/kg HM} \times 0.18 / 0.23 = 1.15 \text{ 万円/kg HM}$ と評価できる。

次に、ガス炉、及び軽水炉燃料の燃料体ウラン密度、及び使用済燃料の発熱率に注目して、ガス炉使用済燃料の中間貯蔵単価を概略評価した。このとき、中間貯蔵単価は、燃料体ウラン密度に逆比例し、発熱率に比例するものと仮定した。炉型ごとの使用済燃料の比較を Table A-3 に示す。

燃料体貯蔵を仮定すると、ウラン密度(ton-U/m³)は、GTHTR300 : BWR : PWR = 0.075 : 1.927 : 2.634 であり、発熱率(W/m³)は GTHTR300 : BWR : PWR = 461 : 4606 : 6681 である。よって、燃料体のコンクリートキャスク貯蔵を想定すると単価は、

$$1.15 \text{ 万円/kg HM} \times 1.927 / 0.075 \times 461 / 4606 = 2.94 \text{ 万円/kg HM}$$

～

$$1.15 \text{ 万円/kg HM} \times 2.634 / 0.075 \times 461 / 6681 = 2.78 \text{ 万円/kg HM}$$

となる。なお、コンパクト貯蔵を想定しても同一の単価となる。よって、ガス炉使用済燃料の中間貯蔵単価を 2.9 万円/kg-HM とする。

ここでは、中間貯蔵単価は、燃料体ウラン密度に逆比例し、発熱率に比例するという単純な仮定を置いたため、燃料体貯蔵とコンパクト貯蔵が同一の単価となった。中間貯蔵単価の評価については、今後、詳細な検討を進める必要がある。

(3) 燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価

以上の検討から、GTHTR300 の燃料サイクルコスト評価で用いるコスト単価を次のとおりと

する。

項目	コスト単価	参考値	単位
1. ウラン購入	0.60	0.52~1.17	万円/kg U
2. 転換	0.09	0.08~0.14	万円/kg U
3. 濃縮	1.58	1.04~1.69	万円/kg SWU
4. 成形加工	52.80	2.60~4.55	万円/kg U
5. 中間貯蔵	2.90	0.78~3.77	万円/kg HM
6. 再処理	31.66	7.02~9.36	万円/kg HM
7. 廃棄物処分	55.08	1.17~7.54	万円/kg HM

なお、参考値はOECD/NEAの報告書⁽⁷⁾のTable 5.5に記載されている値を1\$=130円のレートを仮定して換算した値である。

Table A-1 コスト単価想定のための計算条件 (BWR)

炉心主要諸元				
原子炉タイプ	BWR ③ (ABWR、柏崎 6/7)			
熱出力	3926 MWt ③			
熱効率	34.5 % ②			
平均取出燃焼度	45.0 GWd/t ②			
炉心ウランインベントリ	150.0 ton-U ③			
サイクル長さ	13ヶ月 ④			
初期濃縮度	3.8 wt% ②			
稼働率	80.0 % ②			
取出 U 重量	初期 U 重量の 94.27 % ⑤			
取出 Pu 重量	初期 U 重量の 0.9663 % ⑤			
Pu/Pu 割合(取出 Pu)	63.1 % ⑤			
サイクルコスト		リード/ラグタイム(年)*	ロス率(%)	エスカレーション(%)
ウラン購入 転換	0.17 円/kWh ②	-2.0 ① -1.5 ①	0.5 ①	1.2 ①
濃縮	0.27 円/kWh ②	-1.0 ①		
成型加工	0.29 円/kWh ②	-0.5 ①	1.0 ①	
中間貯蔵	0.03 円/kWh ②	5.0 ①		
再処理	0.63 円/kWh ②	6.0 ①	2.0 ①	
廃棄物処理・処分	0.25 円/kWh ②	56.0 ①		
その他				
貨幣価値基準年	1991年 ①			
燃料装荷年	2000年 ①			
劣化ウラン濃度	0.25 wt% ①			
金利	3.0 % ②			

* リードタイムは燃料装荷時点を基準とし、ラグタイムは燃料取出時点を基準とする。

① "THE ECONOMICS OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE", OECD/NEA (1994).

② 「原子力発電の経済性について」、総合エネルギー調査会原子力部会第 70 回会合（資料 3）、通産省資源エネルギー庁(1999).

③ 「原子力発電便覧」、資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課編.

④ 想定値

⑤ ORIGEN2.1 計算（取出後 5 年冷却を仮定）

Table A-2 コスト単価想定のための計算条件 (PWR)

炉心主要諸元				
原子炉タイプ		PWR ③ (大飯 3/4)		
熱出力	3423 MWt ③			
熱効率	34.5 % ②			
平均取出燃焼度	45.0 GWd/t ②			
炉心ウランインベントリ	86.0 ton-U ③			
バッチ数	3 バッチ ④			
初期濃縮度	4.1 wt% ②			
稼働率	80.0 % ②			
取出 U 重量	初期 U 重量の 94.18 % ⑤			
取出 Pu 重量	初期 U 重量の 1.0589 % ⑤			
Puf/Pu 割合(取出 Pu)	66.9 % ⑤			
サイクルコスト		リード / ラグ タイム(年)*	ロス率(%)	エスカレーション(%)
ウラン購入 転換	0.17 円/kWh ②	-2.0 ① -1.5 ①	0.5 ①	1.2 ①
濃縮	0.27 円/kWh ②	-1.0 ①		
成型加工	0.29 円/kWh ②	-0.5 ①	1.0 ①	
中間貯蔵	0.03 円/kWh ②	5.0 ①		
再処理	0.63 円/kWh ②	6.0 ①	2.0 ①	
廃棄物処理・処分	0.25 円/kWh ②	56.0 ①		
その他				
貨幣価値基準年	1991 年 ①			
燃料装荷年	2000 年 ①			
劣化ウラン濃度	0.25 wt% ①			
金利	3.0 % ②			

* リード タイムは燃料装荷時点を基準とし、ラグ タイムは燃料取出時点を基準とする。

① "THE ECONOMICS OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE", OECD/NEA (1994).

② 「原子力発電の経済性について」、総合エネルギー調査会原子力部会第 70 回会合（資料 3）、通産省資源エネルギー庁(1999).

③ 「原子力発電便覧」、資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課編.

④ 想定値

⑤ ORIGEN2.1 計算（取出後 5 年冷却を仮定）

Table A-3 炉型ごとの使用済燃料の比較

項目	GTHTR300	BWR(柏崎 6/7)	PWR(大飯 3/4)
熱出力	600 MWt	3926 MWt	3423 MWt
初期濃縮度	14 wt%	3.8 wt%	4.1 wt%
バッチ平均取出燃焼度	112 GWd/t	45 GWd/t	45 GWd/t
ウラン装荷量	7.7 ton-U	150 ton-U	86 ton-U
燃料体体積	0.142 m ³ /体	0.089 m ³ /体	0.168 m ³ /体
燃料ピン本数	57 本		
燃料ピン体積	0.027 m ³ /体		
燃料装荷体数	720 体	872 体	193 体
炉心内燃料体体積	102.28 m ³	77.83 m ³	32.65 m ³
炉心内燃料ピン体積	19.14 m ³		
燃料体ウラン重量	0.011 ton-U/体	0.172 ton-U/体	0.446 ton-U/体
ウラン密度			
燃料体内	0.075 ton-U/m ³	1.927 ton-U/m ³	2.634 ton-U/m ³
燃料ピン内	0.402 ton-U/m ³		
発熱率	6130 W/ton-U	2390 W/ton-U	2540 W/ton-U
燃料体内	461 W/m ³	4606 W/m ³	6681 W/m ³
燃料ピン内	2463 W/m ³		

* 発熱率は、ORIGEN2.1による計算結果(取出後、5年)。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	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
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバー	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s/m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}		
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}		
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}		= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}		= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の燃料サイクルコストの検討(受託研究)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。