

JAERI - M
92-079

高温工学試験研究炉の燃料検査基準

1992年6月

小林 紀昭・塩沢 周策・林 君夫
沢 和弘・佐藤 貞夫・福田 幸朔
金子 光信*・佐藤 努*

JAERI-M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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

高温工学試験研究炉の燃料検査基準

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
小林 紀昭・塩沢 周策・林 君夫[†]・沢 和弘
佐藤 貞夫・福田 幸朔[†]・金子・光信^{*}・佐藤 努^{*}

(1992年5月11日受理)

高温工学試験研究炉(HTR)は被覆燃料粒子を基本とした燃料を使用しており、その検査基準に関しては原研及び国内に燃料全般を含む規格は作成されていない。また、外国においても高温ガス炉燃料の明確な検査基準を設けてはいない。このため、HTR燃料の検査に際して基準を定める必要があった。原研では、所内外の専門家の協力を得て、国内、米国及びドイツで実施している燃料の検査を参考にしてHTRの燃料検査基準を策定した。また、HTR燃料では、膨大な数の被覆燃料粒子が検査対象となるので検査効率を考慮して検査個数の抜取り基準も定めた。本報告書は、この燃料検査基準、抜取検査基準及びそれらの解説についてまとめたもので、HTRの燃料は、本基準に基づいて受け入れ検査を行う予定である。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

[†]東海研究所燃料・材料工学部

^{*}原子燃料工業(株)

An Inspection Standard of Fuel for
the High Temperature Engineering Test Reactor

Fumiaki KOBAYASHI, Shusaku SHIOZAWA, Kimio HAYASHI⁺
Kazuhiro SAWA, Sadao SATO, Kosaku FUKUDA⁺
Mitsunobu KANEKO* and Tsutomu SATO*

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 11, 1992)

The High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) uses the fuel comprising coated fuel particles. A general inspection standard for the coated particle fuel, however, has not been established in Japan. Therefore, it has been necessary to prescribe the inspection standard of the fuel for HTTR. Under these circumstances, a fuel inspection standard of HTTR has been established under cooperation of fuel specialists both inside and outside of JAERI on referring to the inspection methods adopted in USA, Germany and Japan for HTGR fuels.

Since a large number of coated fuel particle samples is needed to inspect the HTTR fuel, the sampling inspection standard has also been established considering the inspection efficiency.

This report presents the inspection and the sampling standards together with an explanation of these standards. These standards will be applied to the HTTR fuel acceptance tests.

Keywords: HTTR, Fuel, Inspection, Standard, HTGR, Graphite, Acceptance Test, Sampling, Coated Fuel Particle

⁺ Department of Fuels and Materials Research, Tokai Research Establishment

* Nuclear Fuel Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 高温工学試験研究炉燃料検査基準	2
2.1 燃料検査基準	2
2.2 抜取検査基準	2
3. 高温工学試験研究炉燃料検査基準の解説	13
3.1 検査項目について	13
3.1.1 高温ガス炉燃料検査項目の実態	13
3.1.2 高温工学試験研究炉燃料検査項目の選定理由	13
3.2 燃料検査基準について	14
3.2.1 検査の考え方	14
3.2.2 検査方法及び判定基準	15
3.3 抜取検査基準について	21
3.3.1 抜取検査の考え方	21
3.3.2 用語の意味	22
3.3.3 ロット及びバッチの大きさ	22
3.4 被覆層破損率の抜取検査について	22
3.4.1 検査個数の定め方	22
3.4.2 まとめ	26
4. 結 言	44
謝 辞	44
付録 1 燃料の製造工程	45
付録 2 燃料の検査方法の詳細	49
付録 3 判定基準の具体的な目安	68

Contents

1. Introduction	1
2. Inspection Standard of the HTTR Fuel	2
2.1 Fuel Inspection Standard	2
2.2 Sampling Inspection Standard	2
3. Explication of Inspection Standard	13
3.1 Inspection Items	13
3.1.1 Present State of Inspection Items of the HTGR Fuels	13
3.1.2 Decided Reason of Inspection Items	13
3.2 Inspection Standard	14
3.2.1 Basic Consideration on Inspection Standard	14
3.2.2 Inspection Methods and Criteria	15
3.3 Sampling Inspection Standard	21
3.3.1 Basic Consideration on Sampling Inspection	21
3.3.2 Meaning of Terms for Sampling Inspection	22
3.3.3 Size of Inspection Lots and Production Batches	22
3.4 Sampling Inspection for Failure Fraction of Coating Layer ...	22
3.4.1 Determination of Inspection Unit	22
3.4.2 Summary	26
4. Concluding Remarks	44
Acknowledgements	44
Appendix 1 Production Process of HTTR Fuel	45
Appendix 2 Explanation of Inspection Methods	49
Appendix 3 Concrete Values of Inspection Criteria	68

1. はじめに

高温工学試験研究炉（HTTR）の燃料は、微小な燃料核を熱分解炭素及び炭化けい素で四重に被覆した被覆燃料粒子を基本としている。燃料体は、被覆燃料粒子を黒鉛マトリックスに分散させた燃料コンパクト、黒鉛スリーブ等から成る燃料棒を六角柱状黒鉛ブロックの燃料棒そう入孔に保持する構造である。HTTR炉心は、約5,000本の燃料棒をそう入した150体の燃料体で構成され、炉心領域毎に12種類の異なった濃縮度の燃料体を装荷する。また、被覆燃料粒子の数は、燃料コンパクトあたり約13,000個であり、炉心全体では約10億個に達する。この燃料の特徴は、生成した核分裂生成物を燃料に閉じ込める機能を被覆燃料粒子に持たせていることである。上記のようにHTTR燃料の構造や機能は、軽水炉等の燃料と異なるためにHTTR燃料独自の検査基準が必要となる。さらに、膨大な数の試料を検査対象とするので、検査効率、品質保証等の観点から抜取検査についての検討も必要となる。

日本原子力研究所では、JMTRに設置しているOGL-1（大洗ガスループ1号、Oarai Gas Loop 1）による照射試験等を行うために国内民間企業により製造された高温ガス炉燃料の自主検査を実施してきた。本報告では、これらの研究用に製造された高温ガス炉燃料の自主検査を基礎とし、米国の高温ガス発電炉フォート・セント・ブレイン（Fort Saint Vrain）及びドイツの高温ガス実験炉AVR（Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor）用燃料の検査の実態を調査検討し、これを参考にして高温工学試験研究炉の燃料検査基準を作成した。また、検査基準の策定に際しては、その基準となる技術基準あるいは安全設計のための方針、条件等に関する情報が必要となる。このため、本検査基準の作成に際しては、現在のHTTRの安全設計の考え方及び設計の実態を参考にした。

本検査基準では、被覆燃料粒子の製造から燃料体の完成までを対象として、燃料体構成部品毎に検査項目、検査目的、検査方法及び判定基準について、その基本的要件を示すとともに、燃料粒子被覆層の破損率検査の際の検査個数等について検討を加えた抜取検査の基準について規定を設けた。

また、本報告書には検査基準の解説を設けて、内容の補足及び解釈を統一するための説明並びに基準適用の際の具体的な運用の指針を盛り込むようにした。さらに、本検査基準を作成するに際して参考にした主要な項目については、その内容を本報告書の付録として示した。

2. 高温工学試験研究炉の燃料検査基準

本検査基準は、HTTRの初装荷燃料及び同炉に装荷する類似の燃料（ UO_2 核四重被覆燃料粒子を用いたピン・イン・ブロック型燃料体）に適用するものであり、被覆燃料粒子の製造から燃料体の完成までを対象とする。本検査基準の内容は、燃料検査基準と抜取検査基準とから成る。

2.1 燃料検査基準

本基準では、燃料製造工程に従ってHTTR燃料を12の検査要素に分割し、各々について品質を保証するために必要な検査項目を定め、さらに、それに対する検査方法及び判定基準を規定した。それらを各要素毎にわけて第2.1表に示す。

2.2 抜取検査基準

本基準は、「2.1 燃料検査基準」に基づいて検査を行う際の抜取検査の基準について規定したものである。抜取検査を行う項目は、破壊試験を必要とする検査に加えて被覆燃料粒子の外観並びに燃料コンパクトのウラン量、粒子充填率、マトリックス密度、主要寸法及び緩衝板の寸法である。全数検査の場合も含めて検査ロットあるいは製造バッチあたりの最小検査個数、1試料の大きさ等を第2.2表に示す。

第2.1表 燃料検査基準

(1) 燃料核

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
²³⁵ U濃縮度	²³⁵ U濃縮度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	γ 線法又は質量分析法	設計上の仕様を満たすこと。
直径	直径が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	自動粒径測定装置、X線ラジオグラフィ法又は金相試験	設計上の仕様を満たすこと。
真球度	真球度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	自動粒径測定装置、X線ラジオグラフィ法又は金相試験	1.0からの偏差が著しく大きいこと。
密度	密度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	水銀ピクノメータ法等	偏差は、著しく大きくないこと。
不純物	不純物が規定値以下であることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	化学分析法等	実用上、差し支えないこと。
O/U比	O/U比が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	酸化重量法等	偏差は、著しく大きくないこと。

(2) 被覆層

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
被覆層厚さ	被覆層厚さが規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の機械的強度、耐照射性能を保証する。	自動粒径測定装置、X線ラジオグラフィ法又は金相試験	設計上の仕様を満たすこと。
密度	密度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の耐照射性能を保証する。	第1層：水銀ピクノメータ法等	偏差は、著しく大きくないこと。
		第2層：浮遊沈降法等	
		第3層：浮遊沈降法等	
		第4層：液体置換法又は浮遊沈降法	
光学的異方性因子	光学的異方性因子が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の耐照射性能を保証する。	光学的異方性測定装置 (第2層、第4層)	1.0からの偏差が著しく大きいこと。

(3) 被覆燃料粒子

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
直径	直径が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	自動拉径測定装置、X線ラジオグラフィ法又は金相試験	設計上の仕様を満たすこと。
外表	被覆燃料粒子表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。
断面組織	被覆層が正常に被覆されていることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	金相試験	実用上、差し支えないこと。

(4) 燃料コンバクト

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
不純物	不純物が規定値以下であることを確認することにより、燃料の核的性能を保証する。	化学分析法等	設計上の仕様を満たすこと。
²³⁵ U濃縮度	²³⁵ U濃縮度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	γ 線法又は質量分析法	設計上の仕様を満たすこと。
O/U比	燃料核のO/U比が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	酸化重量法、ポロログラフ法又は比色法	偏差は、著しく大きくないこと。
原料黒鉛粉末の種類	指定した黒鉛粉末の種類であることを確認することにより、燃料の熱的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
パイナダの種類	指定したパイナダの種類であることを確認することにより、燃料の熱的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
ウラン量	ウラン量が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	γ 線法等	設計上の仕様を満たすこと。
露出ウラン率	露出ウラン率が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	電気溶解-硝酸浸出法等	設計上の仕様を満たすこと。
SIC層破損率	SIC層破損率が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	燃焼-硝酸浸出法等	設計上の仕様を満たすこと。

(4) 燃料コンバクト (続き)

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
粒子充填率	粒子充填率が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の組立性を保証する。	計算法	偏差は、著しく大きくないこと。
マトリックス密度	マトリックス密度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	計算法	偏差は、著しく大きくないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料の熱的、機械的性能を保証する。	マイクロメーター、ノギス等	設計上の仕様を満たすこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	目視	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。
マーキング	燃料コンバクトの235U濃度の識別を行うことにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	目視	規定の濃度の対応したマーキングが施してあること。
圧縮強度	燃料コンバクトの機械的強度を確認することにより、燃料の健全性を保証する。	圧縮試験等	実用上、差し支えないこと。

(5) 黒鉛スリーブ

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
黒鉛の種類	指定した黒鉛の種類であることを確認することにより、燃料棒の熱的、核的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の機械的、熱的性能を保証する。	マイクロメーター、ノギス、ゲージ等	設計上の仕様を満たすこと。
真直度	真直度が規定値以下であることを確認することにより、燃料棒の組立性を保証する。	定盤法等	実用上、差し支えないこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料棒の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。

(6) 端柱

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
端柱の種類	指定した端柱の種類であることを確認することにより、燃料棒の熱的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の組立性を保証する。	ノギス等	実用上、差し支えないこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料棒の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。

(7) 燃料板

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
燃料の種類	指定した燃料の種類であることを確認することにより、燃料板の機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
不純物	不純物が規定値以下であることを確認することにより、燃料の核的性能を保証する。	化学分析法等	設計上の仕様を満たすこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の組立性を保証する。	ノギス等	実用上、差し支えないこと。
外観	表面に有害な割れ、付着物等のないことを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、付着物等のないこと。

(8) 燃料棒

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
ウラン量	燃料棒中のウラン量が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の熱的、機械的性能を保証する。	γ線法、化学分析法等	設計上の仕様を満たすこと。
全長	全長が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の組立性を保証する。	ノギス等	設計上の仕様を満たすこと。

(8) 燃料棒 (続く)

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
スタック長さ	燃料コンバクトスタック長さが規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料棒の組立性を保証する。	ノギス、ゲージ等	設計上の仕様を満たすこと。
表面汚染	燃料棒表面の放射線面汚染度が規定値以下であることを確認することにより、燃料棒組立作業時安全を確保する。	スミヤ法等	実用上、差し支えないこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料棒の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。
²³⁵ U濃縮度	燃料棒中の燃料コンバクトのマーキングを確認することにより、 ²³⁵ U濃縮度を確認し燃料の核的、熱的性能を保証する。	目視	規定の ²³⁵ U濃縮度の燃料コンバクトが獲得されていること。
部品構成検査	燃料棒を構成する部品の欠けがないことを確認することにより、燃料棒の健全性を保証する。	目視	部品の欠けのないこと。
マーキング	燃料棒の ²³⁵ U濃縮度を示すマーキングが規定どおりなされていることを確認することにより、燃料の核的、熱的性能を保証する。	目視	規定の濃縮度に対応したマーキングが施してあること。

(9) ダウエルピン

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
黒鉛の種類	指定した黒鉛の種類であることを確認することにより、燃料体の熱的、核的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料体の組立性を保証する。	ノギス等	実用上、差し支えないこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。

(10) 黒鉛ブロック

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
黒鉛の種類	指定した黒鉛の種類であることを確認することにより、燃料体の熱的、機械的性能を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料体の組立性を保証する。	ノギス、マイクログラメーター等	設計上の仕様を満たすこと。
直角度	直角度が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料体の炉心への負荷を保証する。	ゲージ等	設計上の仕様を満たすこと。
外觀	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料体の健全性を保証する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。

(11) 反応度調整材

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
素材の種類	指定した素材の種類であることを確認することにより、反応度調整材の健全性を保証する。	試験検査成績書等の確認	実用上、差し支えないこと。
主要寸法	主要寸法が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料体の組立性を保証する。	ノギス等	実用上、差し支えないこと。
ほう素量	反応度調整材中のほう素量が規定値の範囲にであることを確認することにより、炉心の核的性能を保証する。	化学分析法等	設計上の仕様を満たすこと。
外觀	表面に有害な割れ、欠け、反応度調整材の健全性を保証することにより、	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。

(1.2) 燃料体

検査項目	検査目的	検査方法	判定基準
235U濃縮度	燃料体中の燃料体のマージングを確認することにより、235U濃縮度を確認し、燃料の核的、熱的性能を保證する。	目視	規定の235U濃縮度の燃料棒が裝備されていること。
部品構成検査	燃料体を構成する部品の欠如がないことを確認することにより、燃料体の健全性を保證する。	目視	部品の欠如のないこと。
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないことを確認することにより、燃料体の健全性を保證する。	目視	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。
ウラン量	燃料体中のウラン量が規定値の範囲にあることを確認することにより、燃料体の核的、熱的性能を保證する。	計算法	設計上の仕様を満たすこと。

第2.2表 抜取検査基準

検査対象	検査項目	検査個数	備考
燃料核	^{235}U 濃縮度	1試料/検査ロット	同じ溶解ウラン原液から製造した燃料核の製造バッチ間のバラツキは非常に小さく、全ての製造バッチの値は1試料の結果で代表させる。
	O/U比		
	不純物		
	直径	n粒子/検査ロット	nは従来の製造実績、判定基準等に鑑み50粒子とれば十分である。
	真球度	3試料/検査ロット	1試料は100粒子以上。
	密度	3試料/検査ロット	1試料は1g以上。
被覆粒子 被覆層	被覆層厚さ	n粒子/検査ロット	nは従来の製造実績、判定基準等に鑑み50粒子とれば十分である。
	密度 (第1, 4層)	3試料/検査ロット	第1層(水銀ピクノメータ法)及び第4層(液体置換法)の1試料は4g以上。第4層(浮遊沈降法)の1試料は10粒子以上。
	密度 (第2, 3層)	3試料/検査ロット	1試料は10粒子以上。
	光学的異方性因子	1試料/検査ロット	1試料は5粒子以上。
被覆燃料粒子	直径	n粒子/検査ロット	nは従来の製造実績、判定基準等に鑑み50粒子とれば十分である。
	外観	1試料/検査ロット	1試料は2000粒子以上。
	断面組織	1試料/検査ロット	1試料は20粒子以上。
燃料コンパクト	不純物	1試料/検査ロット	1試料は燃料コンパクト1個以上。
	^{235}U 濃縮度	1試料/検査ロット	「燃料核 ^{235}U 濃縮度」に同じ。
	O/U比	1試料/検査ロット	酸化重量法は1試料4g以上、ポーラログラフ法及び比色法は0.2g以上。(いずれも燃料核重量)
	原料黒鉛粉末の種類	1試料/検査ロット	
	バインダの種類		
	ウラン量	3試料/検査ロット	1試料は燃料コンパクト1個。
	露出ウラン率	n個/検査ロット	nは検査ロットの判定基準を統計的に保証するのに必要な数。
	SiC層破損率		
	粒子充填率	3試料/検査ロット	1試料は燃料コンパクト1個以上。
	マトリックス密度		
圧縮強度			
主要寸法	10%/検査ロット		

検査対象	検査項目	検査個数	備 考
燃料コンパクト	外 観	全 数	
	マーキング		
黒鉛スリーブ	黒鉛の種類	1試料/製造バッチ	
	主要寸法	10%/検査ロット	
	真直度		
	外 観	全 数	
端 栓	黒鉛の種類	1試料/製造バッチ	
	主要寸法	10%/検査ロット	
	外 観	全 数	
緩衝板	素材の種類	1試料/製造バッチ	
	不純物	1試料/製造バッチ 但し、ほう素化合物を使用する場合にはほう素量とし、3試料/製造バッチとする。	
	主要寸法	10個/製造バッチ	
	外 観	10%/検査ロット	
燃料棒	ウラン量	全 数	
	全 長	10%/検査ロット	
	スタック長さ		
	表面汚染率	全 数	
	外 観		
	²³⁵ U濃縮度		
	部品構成検査		
マーキング			
ダウエルピン	黒鉛の種類	1試料/製造バッチ	
	主要寸法	10%/検査ロット	
	外 観	全 数	
黒鉛ブロック	黒鉛の種類	1試料/製造バッチ	
	主要寸法	全 数	
	直角度		
	外 観		

検査対象	検査項目	検査個数	備考
反応度調整材	素材の種類	1試料/製造バッチ	
	主要寸法	10%/検査ロット	
	ほう素量	3試料/製造バッチ	
	外観	10%/検査ロット	
燃料体	²³⁵ U濃縮度	全数	
	部品構成検査		
	外観		
	ウラン量		

3. 高温工学試験研究炉の燃料検査基準の解説

3.1 検査項目について

HTTR燃料検査基準は、HTTR炉燃料開発のために実施してきたOGL-1照射試験燃料の自主検査基準を基礎として、これに米国フォート・セント・ブレイン炉燃料及びドイツAVR炉燃料の検査の実態及び国内の軽水炉、高速炉など既存の燃料検査基準の基本的考え方を参考にしてまとめた。本検査基準でまとめた検査項目を燃料製造工程に合わせて第3.1図に示す。本燃料検査基準では、燃料核から燃料体までの各製造工程において検査項目を定めているほか、 ^{235}U 濃縮度及びウラン量については、全製造工程を通して系統的な検査が可能なように検査項目を定めた。

以下「3.1.1 高温ガス炉燃料検査項目の実態」では、海外炉を含めた高温ガス炉燃料検査項目の比較を行うとともに、「3.1.2 高温工学試験研究炉の燃料検査項目の選定理由」では、それらの項目のうち、HTTR燃料検査基準として採用する項目及び採用しない場合についてはその理由を示す。

3.1.1 高温ガス炉燃料検査項目の実態

OGL-1照射試験燃料、米国フォート・セント・ブレイン炉燃料及びドイツAVR炉燃料の検査の実態を「2.1 燃料検査基準」で定めたHTTR燃料検査項目と合わせて第3.1表に示す。

3.1.2 高温工学試験研究炉の燃料検査項目の選定理由

HTTR燃料では、「3.1.1 高温ガス炉燃料検査項目の実態」に示したOGL-1燃料、FSV燃料及びAVR燃料に共通の検査項目は採用した。ただし、第3.1表に示したHTTR以外の燃料検査項目は、試験・研究に基づくものであり、必ずしも許認可上必要な項目を記載したものではないため、HTTR燃料の検査項目として採用しないものもある。採用しない理由を以下に示す。

(i) 他の検査基準を適用する項目

黒鉛構造物（黒鉛スリーブ、黒鉛ブロック等）に使用する黒鉛素材の材料検査及び内部健全性は、別途定めた「高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準（JAERI-M 91-102）」を適用する。従って不要とした。

(ii) 燃料仕様、形態等が異なる検査項目

HTTR燃料と燃料仕様、形態等が異なる検査項目を第3.2表に示す。

(iii) 高温ガス炉燃料の研究・開発のために設けた検査項目

高温ガス炉燃料の研究・開発のために設けた検査項目を第3.3表に示す。

(iv) 他の検査で確認できる検査項目

高温工学試験研究炉燃料で実施する検査で確認できる検査項目を第3.4表に示す。

3.2 燃料検査基準について

3.2.1 検査の考え方

(1) ^{235}U 濃縮度

H T T Rでは、 ^{235}U 濃縮度の異なった燃料を同じ炉心に装荷する予定であり、燃料核から燃料体までの製造工程全体にわたって厳格な濃縮度管理が要求される。製造工程に沿った濃縮度管理の方法を第3.2図に示す。濃縮度の測定は、燃料核及び燃料コンパクトに対して γ 線法または質量分析法で行う。燃料棒及び燃料体の組立時における濃縮度管理上の過誤を避けるために以下に示す方法で検査を行う。燃料棒は、燃料棒の組立時に燃料コンパクトのマーキングと燃料棒のマーキングが符号することを確認することにより、濃縮度を保証する。燃料体は、燃料体の組立時に燃料棒のマーキングと黒鉛ブロックのマーキングが符号することにより、濃縮度を保証する。さらに、燃料棒上部に設ける回転防止リブの形状を濃縮度毎に変えて特定の濃縮度の燃料棒は特定の黒鉛ブロックにのみそう入できる構造とする。

(2) ウラン量

燃料コンパクトのウラン量は、試料を抜取り、 γ 線法や化学分析等により検査を行う。燃料棒のウラン量は、装荷した燃料コンパクトから算出し、これを記録する。さらに燃料体のウラン量は、装荷する燃料棒の記録をもとに算出し、これを記録する。

(3) 不純物

燃料体を構成する全ての部品について不純物検査を行う。燃料核の不純物検査は、燃料核までの製造工程に著しい過誤のないことを確認するためのものである。燃料コンパクトの不純物は、最終製品である燃料コンパクトで検査する。黒鉛スリーブ、端栓、黒鉛ブロック及びダウエルピンについての不純物は、試験成績書等の証明書により検査を行う。反応度調整材については、不純物による核的影響は小さいので不純物検査は行わない。

(4) O/U比

燃料核及び燃料コンパクトの段階で検査を行う。燃料核の検査は、燃料コンパクトまでの製造工程に著しい過誤のないことを確認するためのものである。また、燃料核から燃料コンパクトまでの製造工程において数回の高温過程を経るためにO/U比は変化するので燃料コンパクトの段階でも検査を行う。将来、燃料核及び燃料コンパクトのO/U比について差がないという実績が十分蓄積された時点で燃料コンパクトの検査は省略できるものとする。

(5) 寸法

全ての燃料体の構成部品について検査を実施する。燃料核から被覆燃料粒子までの検査で

は、対象となる数が非常に多いので抜取検査とする。燃料コンパクトについては、あらかじめ決められた品質水準に十分達しうると考えられるので抜取検査とする。さらに、緩衝板については、その製造上の特徴から許容差公差に対してばらつきの小さいものが製造されるので抜取検査とする。

(6) 外観

全ての燃料体の構成部品について原則として全数検査を実施する。ただし、燃料核及び被覆燃料粒子被覆層については、有害な割れ、欠け等の欠陥があれば燃料核の真球度、被覆燃料粒子の外観あるいはS i C層破損率等の検査で確認できるので外観検査は行わない。また、被覆燃料粒子の外観検査は、検査の対象となる個数が非常に多いので、抜取検査とする。

(7) 黒鉛の種類

黒鉛スリーブ、端栓、ダウエルピンおよび黒鉛ブロックに使用する黒鉛素材の検査は、別途定めた黒鉛検査基準に従うものとする。本検査基準では、黒鉛の種類を確認する検査に限定した。

3. 2. 2 検査方法及び判定基準

「2. 1 燃料検査基準」に示した判定基準では、具体的な判定基準以外に「a：設計上の仕様を満たすこと」、「b：実用上差し支えないこと」及び「c：偏差は、著しく大きくないこと」という判定基準を採用している。これらの区分は、主に次の基準で行っている。

- a：炉設計により基準値及び許容差が変わりうる項目。
- b：① 炉設計上は、基準値及び許容差の指定をせず機能のみを定める項目。
② 従来の研究開発の実績により定めるもので、炉設計によって変更が行われることのない項目。
③ 法令の規定を参考にして定める項目（燃料棒の表面汚染）。
- c：研究開発の実績等に基づく一般的に認められた基準値がある項目。

以下に各検査項目について、2.1燃料検査基準に示した検査方法及び判定基準について補足説明を行う。

(1) 燃料核

① ^{235}U 濃縮度

検査方法は、 γ 線法及び質量分析法のうちから、炉設計上、要求される精度を考慮して定める。

② 直径

検査方法は、自動粒径測定装置（P S Aと表現することもある。ここでP S AはParticle Size Analyzerの略）、X線ラジオグラフ法及び金相試験のうちから、炉設計上、要求される精度等を考慮して定める。

③ 真球度

真球度は、1個の燃料核について最大直径に対する最小直径の比として定義する。判定基準の目安は、1.2以下の燃料核の割合が90%以上とする。

④ 密度

水銀ピクノメータ法は、燃料核が排除した水銀の重量を測定することにより、燃料核の体積を求め、この値と別途測定した燃料核の重量から密度を求める方法である。判定基準の目安は、規定値からの偏差が理論密度で表して3%以内とする。理論密度は、O/U比が2.00の値とする。

⑤ 不純物

燃料核までの製造工程に著しい過誤のないことを確認するための検査で、対象元素は、原料ウランに含まれている可能性のあるカルシウム、燃料核の製造工程に混入する恐れのある炭素、鉄及び製品管理状態を反映すると考えられる蒸発性不純物を対象とする。判定基準の目安は、製造実績を有する燃料核と著しくことならないこととする。

⑥ O/U比

検査方法は、酸化重量法、ポーラログラフ法及び比色法のうちから、精度等を考慮して定める。判定基準の目安は、製造実績及び通商産業省令第63号「発電用核燃料物質に関する技術基準を定める省令」の規定を参考にして、1.99～2.02とする。

(2) 被覆燃料粒子被覆層

① 被覆層厚さ

検査方法は、自動粒径測定装置、X線ラジオグラフ法及び金相試験のうちから、炉設計上、要求される精度等を考慮して定める。

② 密度

第1被覆層の判定基準の目安は、規定値からの偏差が 0.15 g/cm^3 以内、第2被覆層及び第4被覆層の判定基準の目安は、規定値からの偏差が 0.1 g/cm^3 以内、第3被覆層の判定基準目安は、 3.18 g/cm^3 以上とする。第4被覆層の検査で液体置換法を採用する場合は、原則としてn-ブチルアルコールを使用する。第3被覆層及び第4被覆層の検査で浮遊沈降法を採用する場合は、1個の被覆燃料粒子から1試片を採取し、10試片(10粒子)以上で1試料とする。

③ 光学的異方性因子

光学的異方性因子(OPTAFと表現することもある。ここでOPTAFはOPTical Anisotropy Factorの略)は、熱分解炭素の結晶の配向性の程度を表すもので、熱分解炭素の蒸着面(粒子外周の接線方向)を基準として定める。1個の被覆燃料粒子について直角4方向の測定を行い、5個以上の被覆燃料粒子で1試料とする。判定基準の目安は、1.00からの偏差が0.04以内とする。

(3) 被覆燃料粒子

① 直径

検査方法は、自動粒径測定装置、X線ラジオグラフ法及び金相試験のうちから、炉設計上、要求される精度等を考慮して定める。

② 外観

判定基準の目安は、拡大鏡等の検査で著しい割れ、欠け、付着物等が認められないこととする。

③ 断面組織

被覆燃料粒子断面の金相試験により、検査を行う。判定基準の目安は、試験粒子全てが正常に被覆されていることとする。

(4) 燃料コンパクト

① 不純物

判定基準は、不純物の核的な影響を考慮して、炉設計により定める。

② ^{235}U 濃縮度

検査方法は、 γ 線法及び質量分析法のうちから、炉設計上、要求される精度を考慮して定める。

③ O/U比

検査方法は、酸化重量法、ポーラログラフ法及び比色法のうちから、精度等を考慮して定める。判定基準の目安は、製造実績及び通商産業省令第63号「発電用核燃料物質に関する技術基準を定める省令」の規定を参考にして、1.99～2.02とする。

④ 原料粉末の種類

本検査は、使用する原料粉末が照射実績のある黒鉛粉末と同等の性能を有することを規定するために設けたものである。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、確認する項目である黒鉛粉末の種類、密度、不純物、粒径等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異なることを指す。

⑤ バインダの種類

本検査は、使用するバインダが照射実績のあるバインダと同等の性能を有することを規定するために設けたものである。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、確認する項目であるバインダの種類、化学組成、灰分、融点等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異なることを指す。

⑥ ウラン量

検査方法は、 γ 線法または化学分析法のうちから、精度等を考慮して定める。

⑦ 露出ウラン率

露出ウラン率は、燃料コンパクト中の全ウラン量に対する露出ウラン量（燃料コンパクト中の全ウラン量と被覆燃料粒子被覆層に貫通破損のない粒子に含まれるウラン量の差）の比として定義する。検査は、硝酸溶液中で燃料コンパクトを電気化学的に解砕し、煮沸硝酸溶液中で露出ウランを溶出して、定量する方法による。

⑧ SiC層破損率

SiC層破損率は、被覆燃料粒子の第3被覆層であるSiC層の破損割合を表すもので、燃料コンパクト中の全ウラン量に対するSiC層が破損した被覆燃料粒子中にあるウラン量の比として定義する。検査は、燃料コンパクトを空气中で燃焼した後、SiC層の破損した被覆燃料粒子に含まれるウランを硝酸溶液で溶出、定量する方法による。

⑨ 粒子充填率

粒子充填率は、燃料コンパクト体積に対する充填した被覆燃料粒子の体積の比として定義する。被覆燃料粒子及び燃料コンパクトの体積は、「(4) 燃料コンパクト ⑩ 主要寸法」の結果に基づき、計算により求める。判定基準の目安は、規定値からの偏差が3%以内とする。

⑩ マトリックス密度

マトリックス（黒鉛素地）とは、燃料コンパクトのうち、被覆燃料粒子を除く部分を指す。マトリックス密度は、マトリックス重量をマトリックス体積で除した値として定義する。判定基準の目安は、規定値からの偏差が 0.05 g/cm^3 以内とする。

⑪ 主要寸法

主要寸法とは、外径、内径及び長さを指す。判定基準は、炉設計により定めるものとするが、偏差の目安は、外径 0.1 mm 、内径 0.2 mm 及び長さ 0.5 mm 以内とする。

⑫ 外観

割れの形状や大きさ、欠けの形状や大きさ及び付着物は、多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

⑬ マーキング

本検査は、燃料コンパクトに施したマーキングにより、燃料棒の ^{235}U 濃縮度検査を実施するためのものである。マーキングとは、燃料コンパクト表面に施した刻印、刻字や識別用の形状等を指す。

⑭ 圧縮強度

検査は、燃料コンパクト長さ方向の一軸圧縮試験により行うものとし、検査用燃料コンパクトが破壊する荷重を検査結果として表示する。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、これまでの製造実績に基づく値と著しく異ならないことを指す。

(5) 黒鉛スリーブ

① 黒鉛の種類

本検査は、使用する黒鉛素材が、照射実績のある黒鉛素材と同等の性能を有することを規定するために設けたものである。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、確認する項目である黒鉛の種類、密度、引張り強度、不純物等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異ならないことを指す。

② 主要寸法

主要寸法とは、長さ、外径、内径、底厚、スペーサ位置等を指す。

③ 真直度

判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、燃料棒に組立てた後、支障なく燃料体に組立てられることを指す。

④ 外観

割れの形状や大きさ、欠けの形状や大きさ及び付着物は、多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(6) 端栓

① 黒鉛の種類

「(5) 黒鉛スリーブ ①黒鉛の種類」に同じ。

② 主要寸法

主要寸法とは、長さ及び外径を指す。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、支障なく燃料棒に組立てられることを指す。

③ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

(7) 緩衝板

① 素材の種類

本検査は、使用する緩衝板が、照射実績のある緩衝板と同等の性能を有することを規定するために設けたものである。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、素材の種類、緩衝機能、熱処理温度等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異なることを指す。

② 不純物

判定基準は、不純物の核的な影響を考慮して炉設計により定める。ただし、出力ピークを低減するため緩衝板にほう素化合物を混入する場合は、ほう素量の検査で不純物の検査に代える。

③ 主要寸法

主要寸法とは、外径及び厚さを指す。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、支障なく燃料棒に組立てられることを指す。

④ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

(8) 燃料棒

① ウラン量

燃料棒のウラン量は、「(4) 燃料コンパクト ⑥ ウラン量」の結果から算出する。

② 表面汚染

判定基準の目安は、製造実績に基づいて、科学技術庁告示「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技術上の基準に係る細目等を定める告示」第4条の輸送物表面密度限度の百分の一とする。

③ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

④ ^{235}U 濃縮度

検査は、装荷した燃料コンパクトのマーキングを記録で確認する方法による。

⑤ 部品構成検査

本検査は、燃料棒が規定どおりの部品から構成されていることを確認するためのものである。部品とは、黒鉛スリーブ、端栓、燃料コンパクト及び緩衝板を指す。検査は、燃料棒に装荷した部品の記録を確認する方法による。

⑥ マーキング

本検査は、燃料棒に施したマーキングにより、 ^{235}U 濃縮度検査を実施するためのものである。マーキングとは、燃料棒表面に施した刻印、刻字や識別用の形状等を指す。

(9) 黒鉛ブロック

① 黒鉛の種類

「(5) 黒鉛スリーブ ①黒鉛の種類」に同じ。

② 主要寸法

主要寸法とは、全長、対面間距離、燃料棒そう入孔、燃料棒そう入孔位置、ダウエル孔位置等を指す

③ 直角度

黒鉛ブロック底面を基準とし、黒鉛ブロックの外周部を検査する。

④ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

(10) ダウエルピン

① 黒鉛の種類

「(5) 黒鉛スリーブ ①黒鉛の種類」に同じ。

② 主要寸法

主要寸法とは、長さ及び外径を指す。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、支障なく燃料体に組立てられることを指す。

③ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

(11) 反応度調整材

① 素材の種類

判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、使用条件下で形状が安定していることを指す。

② 主要寸法

主要寸法とは、長さ及び外径を指す。判定基準の「実用上、差し支えないこと」とは、支障なく燃料体に組立てられることを指す。

③ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

(12) 燃料体

① ^{235}U 濃縮度

検査は、装荷した燃料棒のマーキングを記録で確認する方法による。

② 部品構成検査

検査は、燃料体が規定どおりの部品から構成されていることを確認するためのものである。部品とは、黒鉛ブロック、燃料棒及びダウエルピンを指す。また、反応度調整材の検査も行う。検査は、燃料体に装荷した部品の記録を確認する方法による。

③ 外観

「(5) 黒鉛スリーブ ④ 外観」に同じ。

④ ウラン量

燃料体のウラン量は、「(8) 燃料棒 ① ウラン量」の結果から算出する。検査は、燃料体の記録を確認する方法による。

3.3 抜取検査基準について

3.3.1 抜取検査の考え方

高温工学試験研究炉燃料の検査個数を定める基本的な考え方は、以下のとおりである。

燃料核、被覆燃料粒子被覆層、被覆燃料粒子及び燃料コンパクトの破壊検査項目については抜取検査とする。燃料コンパクト、黒鉛スリーブ等の非破壊検査項目は、あらかじめ決められた品質水準に十分達しうるか、または統計的に十分保証しうると考えられる場合は抜取検査とする。

各検査項目に対する抜取検査数は、検査項目の特性、従来の製造実績、判定基準の範囲及び検査項目の重要度をもとに分類した結果を第3.3図に示す。

分類Aは、その特性値が物理的、化学的に均一とみなせるため、母集団から確認のため一定量を1試料として採取すれば十分な検査項目である。1試料の検査結果が判定基準を満足するとき、当該検査ロットを合格とする。

分類Bは、分類Aと異なり母集団を構成している個々の特性値が基本的に変動するが、従来の製造実績からみて変動幅は比較的小さいため、検査ロットから複数の試料を抜取れば十分な検査項目である。試料の検査結果が全て判定基準を満足するとき、当該検査ロットを合格とする。

分類Cは、分類Bより特性値の変動幅が大きい場合で、検査ロットの判定基準を統計的に保証するために必要な数を検査する項目である。統計処理をした結果が判定基準を満足するとき、当該検査ロットを合格とする。

3.3.2 用語の意味

抜取検査基準に使用した用語は、「JIS Z 8101 品質管理用語」から引用したもので、その意味は以下のとおりである。ただし、「製造バッチ」は、高温工学試験研究炉の検査のために定めたものである。

「抜取検査」とは、検査ロットから、あらかじめ定められた抜取検査方式に従ってサンプルを抜き取って試験して、その検査ロットの合否を判定する検査をいう。

「全数検査」とは、検査ロット中のすべての検査単位について行う検査をいう。

「検査ロット」とは、検査の対象とするロットをいう。ここでロットとは、等しい条件下で生産し、又は生産されたと思われる品物の集まりをいう。

「検査単位」とは、検査の目的のために選んだ単位、又は単位量をいう。

「製造バッチ」とは、1製造工程で1回に処理する量をいい、各工程毎に、燃料核バッチ、被覆バッチ及び燃料コンパクトバッチがある。

3.3.3 ロット及びバッチの大きさ

燃料核、被覆燃料粒子及び燃料コンパクトについて検査ロット及び製造バッチの大きさの目安を第3.4図に示す。

3.4 被覆層破損率の抜取検査について

高温工学試験研究炉燃料の検査項目のうち重要項目と考えられるSiC層破損率、露出ウラン率の検査抜取検査方法について以下に示す。

3.4.1 検査個数の定め方

本検査項目は破壊検査であり、抜取検査を実施する。その実施にあたり統計的に保証するのに必要な個数を定めるため、抜取検査方式の案を以下に示す。

(案A)

J I S Z 9 0 5 1 母平均の区間推定による方法(標準偏差未知)を用いる方法

この規格は、母集団の標準偏差がわかっていない場合に、母集団(またはそれをよく代表すると思われるロット)から得た測定値に基づいて、母集団の平均を含むことの確率がたとえば95%となる区間を求める方法について規定する(母標準偏差未知)。

式で表すと

$$\bar{X} \pm t(f, \alpha) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{両側規格}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

S i C層破損率の場合は片側規格であるので

$$\bar{X} \pm t(f, 2\alpha) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{片側規格}) \quad \text{-----} \quad (2)$$

となる。ここで

 \bar{X} : サンプルの平均値

t: 信頼率と抜取数によってt分布より決まる定数

 $1 - \alpha$: 信頼率

s: サンプルの標準偏差

n: 抜取数(コンパクト数)

f: 自由度(n-1)

母集団より試料をサンプリングして試料の \bar{X} 、sが求められると、(2)式より母集団の区間推定幅は

$$t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{で決定される。}$$

ここで過去の実績として、例えば第12次及び第13次OGL-1燃料体のS i C層破損率の例をとると、 $\bar{X} = 0.5 \times 10^{-3}$ 、 $s = 0.5 \times 10^{-3}$ である。

S i C層破損率の規格を 1.5×10^{-3} とすれば

$$\bar{X} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq 1.5 \times 10^{-3}$$

より

$$t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq 1.0 \times 10^{-3}$$

となる。ここでtは抜取数nと信頼率 $1 - \alpha$ によって定まる。

サンプルの標準偏差 s をパラメータとし、抜取数 n と t — $\frac{s}{\sqrt{n}}$ の関係を第 3. 5 図

(99%信頼率)、第 3. 6 図 (95%信頼率) に示す。

本例では、99%信頼率では n の値として 5 個以上、95%信頼率では 3 個以上とすれば良いことがわかる。

同様に露出ウラン率について、第 1 2 次及び第 1 3 次 O G L - 1 燃料体の場合には

$$\bar{x} = 1.8 \times 10^{-5}, s = 1.4 \times 10^{-5}$$

である。露出ウラン率の規格を 1.5×10^{-4} とすれば

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq 1.5 \times 10^{-4}$$

より

$$t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq 1.32 \times 10^{-4}$$

となる。S i C 層破損率と同様の方法により、99%信頼率では n の値として 3 個以上、95%信頼率では n の値として 2 個以上とすれば良いことがわかる。

(案 B)

J I S Z 9050 母平均の区間推定による方法 (標準偏差既知) を用いる方法

この規格は、母集団の標準偏差がわかっている場合に、母集団 (またはそれをよく代表すると思われるロット) から得た測定値に基づいて、母集団の平均を含むことの確率がたとえば 95% となる区間を求める方法について規定する (母標準偏差既知)。

式で表すと

$$\bar{x} \pm K_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{両側既知}) \quad \text{-----} \quad (3)$$

S i C 層破損率の場合は片側規格であるので

$$\bar{x} + K_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{片側規格}) \quad \text{-----} \quad (4)$$

となる。ここで

\bar{x} : サンプルの平均値

$K_{\frac{\alpha}{2}}, K_{\alpha}$: 信頼率によって決まる定数

n : 抜取数 (コンパクト数)

σ : 母標準偏差

である。案Aで用いた過去の実績の s (サンプルの標準偏差) を母標準偏差とすれば

$$\bar{X} = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$\sigma = 0.5 \times 10^{-3}$$

となる。SiC層破損率の規格を 0.5×10^{-3} とすれば

$$\bar{X} + K_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq 1.5 \times 10^{-3}$$

より

$$K_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq 1.0 \times 10^{-3}$$

である。ここで K_{α} は 99%信頼率では 2.326、95%信頼率では 1.645 である。

母標準偏差 σ をパラメータとし、抜取数 n と $K_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ の関係を第3.7図(99%信頼率)

及び第3.8図(95%信頼率)に示す。第3.7図から n の値として2個以上、第3.8図から n の値として1個以上とすれば良いことがわかる。

(案C)

ポアソン分布を用いる方法

きわめてまれに起こる分布は、ポアソン分布に従う。この分布は、二項分布の極限としての分布であり、二項分布同様、不良数や故障等の分布を表す離散形の分布である。

二項分布は、 n 回の試行中に事象Aが r 回起こる確率 $f(r)$ の分布であり、次式で与えられる。

$$f(r) = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r}$$

ここに p は事象Aの起こる確率、 $(1-p)$ は事象Aの起こらない確率である。 n を抜取サンプル数、 r を不良数とすれば $f(r)$ はサンプル n 個中に不良 r が見いだされる確率を示す。ここで期待値 $np = m$ を一定にして上式から $p \rightarrow 0$ 、 $n \rightarrow \infty$ の極限を求めるとポアソン分布になる。すなわち、

$$f(r) = \frac{m^r}{r!} e^{-m} \quad (r = 0, 1, \dots)$$

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(\lambda n)^r}{r!} e^{-\lambda n} = \beta$$

となる。ここで

$L(\lambda)$: 合格の確率

c : 不合格個数 (粒子破損個数)

λ : 不良が発生する確率 (粒子破損率)

n : サンプル数 (被覆燃料粒子数)

β : 消費者危険、 $(1 - \beta)$ が信頼水準

である。第3.5表及び第3.6表にポアソン分布を用いた被覆燃料粒子破損率の抜取検査の計算条件及び計算結果を示す。第3.9図に信頼率を変えた場合のサンプル数 n に対する不合格個数 c の計算結果を示す。第3.9図において、S i C層破損率の抜取検査を例えば99%信頼率で実施するには、サンプル粒子数に対応した破損粒子数99%信頼率の曲線の下側にあれば良いことになる。具体例としてコンパクト1個分の粒子約13,000個を抜き取った場合、破損粒子 (実際は破損粒子相当個数) が4個以下 (不良率換算 5.13×10^{-5} 以下) であればよい。

3.4.2 まとめ

現時点で考えられる案A、案B及び案Cより次の検査方式を採用することが適切と思われる。

S i C層破損率

過去の実績におけるデータの正規性に鑑み、案Aによる抜取方式で開始し、品質の安定性 (サンプルの標準偏差の安定性) を確認のうえ案Bへ移行する。また、破損率が規格値と比して十分小さいことが確認されれば、案Aまたは案Bから案Cへ移行する。

露出ウラン率

過去の実績からみるとポアソン分布としている案Cの抜取検査方式が適切であるが、データ数が増えれば正規分布で近似できるので案Aまたは案Bの適用も考慮する。

第3.1表 高温ガス炉燃料検査項目の実態

	HTRR燃料 *	OGI-1燃料 **	FSV燃料 **	AVR燃料 **
燃料核	① 材料検査 (1) ^{235}U 濃縮度 (2) O/U比 (3) 不純物 ② 寸法検査 (1) 直径 (2) 真球度 ③ 密度検査	① 材料検査 (1) ^{235}U 濃縮度 (2) O/U比 (3) 不純物 ② 寸法検査 (1) 直径 (2) 真球度 ③ 密度検査 ④ 外観検査	① 材料検査 (1) ^{235}U 濃縮度 (2) Th/U比 (3) 炭素及び酸素含有量 (4) 不純物 ② 寸法検査 (1) 直径 (2) 真球度 ③ 密度検査	① 材料検査 (1) ^{235}U 濃縮度 (2) (Th, U) O_2 結晶構造 ② 寸法検査 (1) 直径 (2) 真球度 ③ 密度検査
燃料粒子被覆層	① 材料検査 (1) 高密度PyC層 光学的異方性因子 (第2, 第4層) ② 寸法検査 (1) 被覆層厚さ (第1~第4層) ③ 密度検査 (1) 被覆層密度 (第1~第4層)	① 材料検査 (1) 高密度PyC層 光学的異方性因子 (第2, 第4層) (2) SiC層破損率 (3) SiC層のC/Si (4) SiC層の遊離Si (5) 第4層結晶子径 ② 寸法検査 (1) 各被覆層厚さ ③ 密度検査 (1) 各被覆層密度 ④ 外観検査 (1) SiC層の外観	① 材料検査 (1) 高密度PyC層 光学的異方性因子 (第2, 第4層) (2) 各被覆層欠陥 ② 寸法検査 (1) 各被覆層厚さ ③ 密度検査 (1) 各被覆層密度	① 材料検査 (1) 高密度PyC層 光学的異方性因子 (第2層) (2) 被覆層ウラン汚染率 ② 寸法検査 (1) 各被覆層厚さ ③ 密度検査 (1) 各被覆層密度
被覆燃料粒子	① 材料検査 (1) 断面組織 ② 寸法検査 (1) 直径 ③ 外観検査	① 材料検査 (1) ウラン含有率 (2) 被覆層不純物 (3) 燃料核O/U比 (4) 露出ウラン率 (5) 破壊強度 (6) 断面組織 ② 寸法検査 (1) 直径 (2) 真球度 ③ 密度検査	① 材料検査 (1) U及びTh含有率 (2) 不純物(ほう素当量) (3) Fe不純物 (4) 欠陥粒子 ② 寸法検査 (1) 直径	① 材料検査 (1) U及びTh含有率 (2) 不純物(ほう素当量) (3) 露出ウラン率 ② 寸法検査 (1) 直径 ③ 外観検査

* HTTR: 高温工学試験研究炉

** 発注仕様に基づく検査項目

	HTTR燃料	OGL-1燃料 **
黒鉛素材		① 材料検査 (1) 引張り強度 (2) 不純物 (3) 外観検査 (4) 内部欠陥 (5) 熱伝導率 (6) 電気伝導度 (7) ヤング率 (8) 圧縮破壊強度 (9) 曲げ強度 (10) ポアソン比 (11) 灰分 (12) 密度
黒鉛スリーブ	① 材料検査 (1) 黒鉛の種類 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 (2) 真直度 ③ 外観検査	① 材料検査 (1) 銘柄指定 (強度、不純物等) (2) 機械的強度 (圧縮破壊強度) ② 寸法検査 (1) 主要寸法 (2) 真直度 ③ 外観検査 ④ 内部健全性
緩衝板	① 材料検査 (1) 素材の種類 (2) 不純物 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 ③ 外観検査	① 材料検査 (1) 銘柄指定 (2) 不純物 (3) 収縮率 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 ③ 外観検査
端栓	① 材料検査 (1) 黒鉛の種類 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 ③ 外観検査	① 材料検査 (1) 銘柄指定 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 ③ 外観検査
燃料棒	① 材料検査 (1) ウラン量 (2) ²³⁵ U濃縮度 ② 寸法検査 (1) 全長 (2) スタック長さ ③ 表面汚染 ④ 外観検査 (1) 外観 (2) マーキング ⑤ 部品構成検査	① 材料検査 (1) ウラン量 ② 寸法検査 (1) 主要寸法 (2) スタック長さ ③ 表面汚染率 ④ 内部健全性 ⑤ 外観検査 (1) 外観

	HTTR燃料	OGL-1燃料**
黒鉛ブロック	<ul style="list-style-type: none"> ① 材料検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 黒鉛の種類 ② 寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 主要寸法 (2) 直角度 ③ 外観検査 	<ul style="list-style-type: none"> ① 材料検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 銘柄指定 (強度, 不純物等) ② 寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 主要寸法 ③ 外観検査 ④ 内部健全性
ダウエルピン	<ul style="list-style-type: none"> ① 材料検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 黒鉛の種類 ② 寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 主要寸法 ③ 外観検査 	
反応度調整材	<ul style="list-style-type: none"> ① 材料検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 素材の種類 (2) ほう素量 ② 寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) 主要寸法 ③ 外観検査 	
燃料体	<ul style="list-style-type: none"> ① 材料検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) ²³⁵U濃縮度 (2) ウラン量 ② 部品構成検査 ③ 外観検査 	<ul style="list-style-type: none"> ① 寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> (1) ブロックとスリーブ間のガスギャップ ② 外観検査

第3.2表 燃料仕様、形態等が異なる検査項目

検査項目		採用しない理由
燃料核	F S V 燃料	<p>Th 燃料は、本検討の対象外。</p> <p>炭化物燃料では必要であるが、本検討の対象外。</p> <p>(Th, U) の混合酸化物であることを確認するために実施している。本検討の対象外。</p> <p>蒸着温度の高い高密度熱分解炭素は、蒸着時にウランの汚染が問題となる。蒸着温度の低い高密度熱分解炭素を使用する H T T R では不要。</p>
	Th/U比	
	炭素及び酸素含有量	
	A V R 燃料	
	結晶構造	
	被覆層ウラン汚染率	
被覆燃料粒子	F S V, A V R 燃料	Th 燃料は、本検討の対象外。
	Th含有率	
燃料コンパクト等	F S V 燃料	<p>Th 燃料は、本検討の対象外。</p> <p>F S V では、燃料を高温で塩素洗浄するので検査を実施している。H T T R では塩素洗浄は行わない。</p> <p>A V R 燃料は、直接冷却材に接触するために実施している。H T T R 燃料は、燃料コンパクトを黒鉛スリーブに収める構造のため、腐食特性は重要でない。</p>
	Th量	
	塩素量	
	A V R 燃料	
	腐食速度	
燃料コンパクト等	熱伝導率	<p>A V R 燃料は、燃料部と外皮層からなるため、両者を組合せた熱伝導率の測定が必要となる。H T T R では研究開発の結果に基づいて、充分保守的に熱伝導率を定めているので不要である。</p> <p>A V R 燃料は、燃料部と外皮層からなる球状燃料であり、照射が進むと両者の剝離が生じる恐れがある。このため、熱膨張率の異方性の検査が必要となる。構造の異なる H T T R では不要。</p> <p>H T T R では、外皮層はないので対象外。</p>
	異方性	
	外皮層厚さ	

第3.3表 高温ガス炉燃料の開発，研究のために設けた検査項目

検査項目		採用しない理由
被覆燃料粒子被覆層	OGL-1燃料 第4層結晶子径	この値は，熱分解炭素被覆層の密度，光学的異方性因子を定めると一義的に定まるものであり，不要である。
被覆燃料粒子	OGL-1燃料 破壊強度 密度 ウラン含有率	この検査項目は，照射前後の破壊強度の変化を調べるために設けたものである。 被覆燃料粒子単体の研究に必要な検査項目であり，燃料コンパクトでは不要である。
燃料コンパクト等	OGL-1燃料 内部組織 ウランの不均質度	照射前後の内部組織を調べるために設けたものである。 この検査項目は，コンパクト中のウラン量を調整するために希釈粒子を混合する場合に設けたもので，希釈のないHTTR燃料では不要である。
緩衝板	OGL-1燃料 収縮率	照射前後の変化を調べるために設けたものである。

第3.4表 他の検査で確認できる検査項目

検査項目		採用しない理由
燃料核	OGL-1燃料 外観	「燃料核 真球度検査」で確認できる。
燃料粒子被覆層	OGL-1燃料 SiC層の外観 FSV燃料 被覆層欠陥	「燃料コンパクト SiC層破損率」で確認できる。 「被覆燃料粒子 断面組織」の検査に相当する。
被覆燃料粒子	OGL-1燃料 被覆層不純物 FSV燃料 Fe不純物 欠陥粒子 OGL-1燃料 SiC層のC/Si SiCの遊離Si 燃料O/U比 露出ウラン率 真球度	「燃料コンパクト 不純物」で検査を実施する。 「燃料コンパクト 不純物」で検査を実施する。 「被覆燃料粒子 断面組織」の検査に相当する。 SiC中の過剰のCやSiは、SiCの密度を検査することにより確認できる。 「燃料コンパクト O/U比」で検査を実施する。 「燃料コンパクト 露出ウラン率」で検査を実施する。 「被覆燃料粒子 外観」で確認できる。
燃料コンパクト等	OGL-1燃料 バインダ残留炭素 直角度 真円度 FSV燃料 炭素 けい素量 マトリックスの気孔率	「燃料コンパクト マトリックス密度」で確認できる。 「燃料コンパクト 寸法検査」で確認できる。 「燃料コンパクト 寸法検査」の検査に相当する。 この項目は、燃料コンパクト中の炭素及びけい素量を検査するものである。HTTRでは、「燃料コンパクトのマトリックス密度」及び「燃料コンパクトの粒子充填率」の検査で確認できる。 「燃料コンパクトのマトリックス密度」で確認できる。
燃料棒	OGL-1燃料 内部健全性	この検査は、燃料構成部品が燃料棒内に正常に装荷されていることを検査するもので本燃料検査基準の「燃料棒 部品構成検査」に相当する。

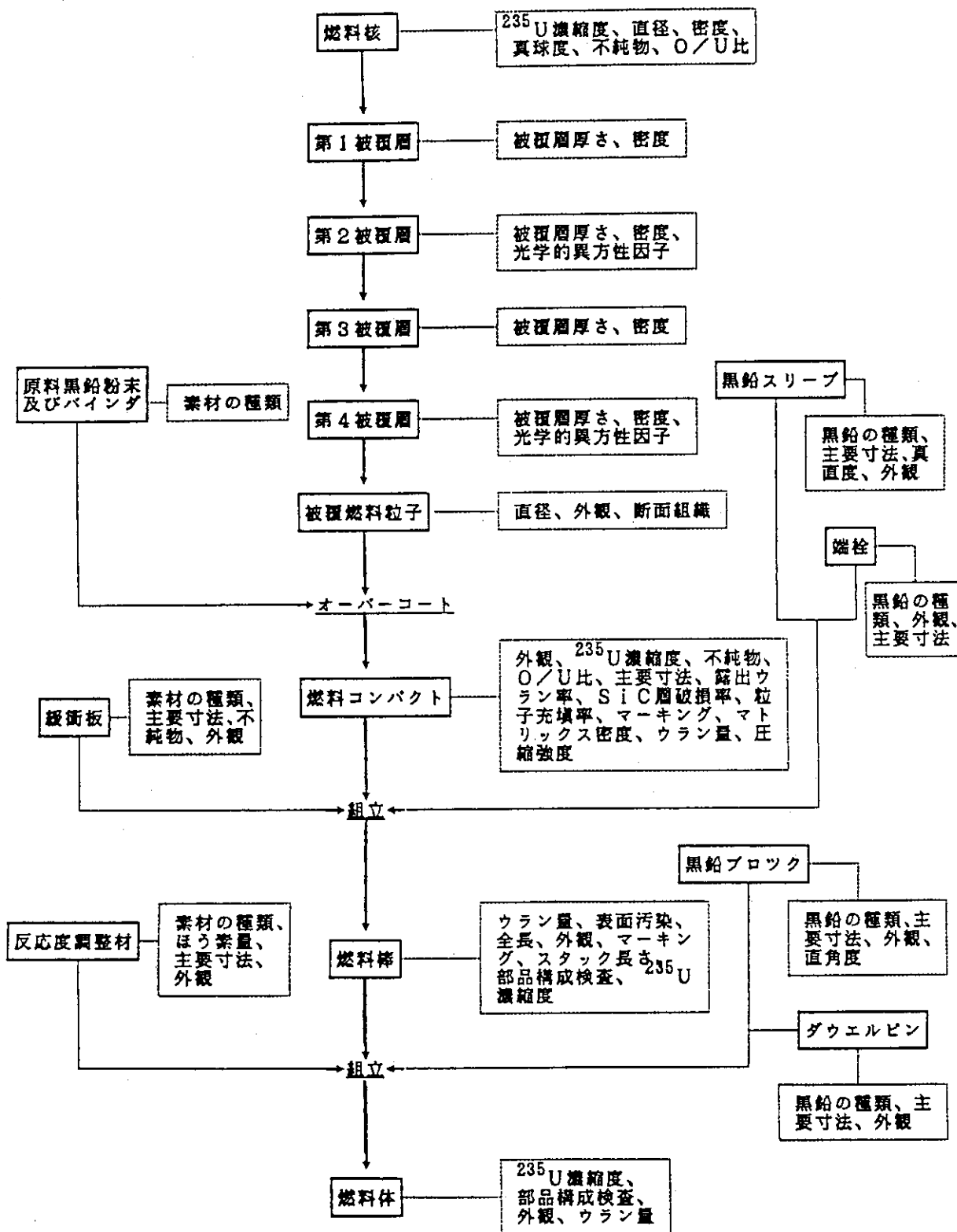
第3.5表 ポアソン分布による被覆燃料粒子破損率の抜取検査の計算条件

	破 損 率 λ	破損粒子数 c	信 頼 水 準 $(1 - \beta)$
露出ウラン率	1.5×10^{-4}	0~5	0.8, 0.9, 0.95, 0.99
SiC層破損率	1.5×10^{-3}		

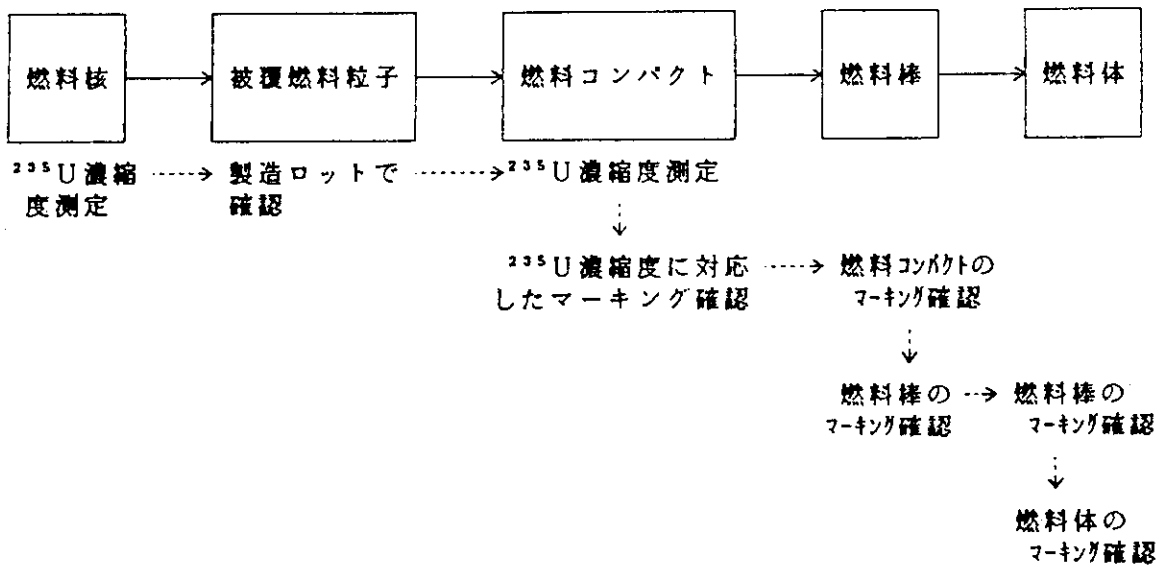
第3.6表 ポアソン分布による信頼水準 $(1 - \beta)$ を満足するサンプル個数

($1 - \beta$) 信頼水準を満足するサンプル個数

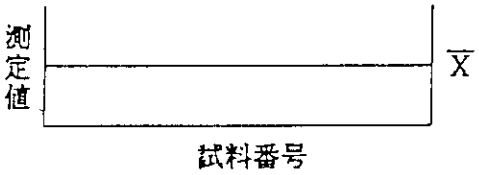
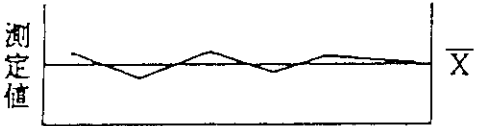
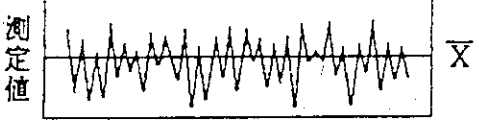
	$(1 - \beta)$ / c	0	1	2	3	4	5
露出ウラン率	0.80	10800	20000	28600	36800	44800	52700
	0.90	15400	26000	35500	44600	53300	61800
	0.95	20000	31600	42000	51700	61000	70100
	0.99	30700	44200	56000	66900	77300	87300
SiC層破損率	0.80	1080	2000	2860	3680	4480	5270
	0.90	1540	2600	3550	4460	5330	6180
	0.95	2000	3160	4200	5170	6100	7010
	0.99	3070	4420	5600	6690	7730	8730




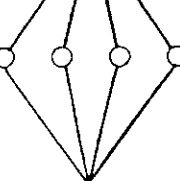

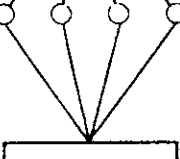

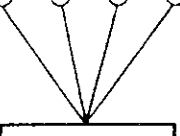
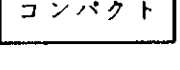
第3.1図 高温工学試験研究炉燃料の製造工程における検査項目



第3.2図 ^{235}U 濃縮度管理の方法

分類	検査データのばらつきの程度	検査項目	検査ロット又は製造バッチあたりの検査個数
A	<p>検査データのばらつきが判定基準の範囲も考慮して小さい場合</p> 	<p>燃料核の ^{235}U濃縮度, 燃料核のO/U比, 燃料核不純物, 被覆燃料粒子の外観, 被覆燃料粒子断面組織, 燃料粒子被覆層の光学的異方性因子, 燃料コンパクト不純物, 燃料コンパクト ^{235}U濃縮度, 原料黒鉛粉末の種類, バインダの種類, 燃料コンパクトのO/U比, 黒鉛の種類, 緩衝板の不純物, 緩衝板の素材の種類, 反応度調整材の素材の種類</p>	<p>1 試料</p>
B	<p>検査データのばらつきが判定基準の範囲も考慮して比較的小さい場合</p> 	<p>燃料核の真球度, 燃料核の密度, 燃料粒子の被覆層密度, 燃料コンパクトのウラン量, 燃料コンパクトのマトリックス密度, 燃料コンパクト圧縮強度, 被覆燃料粒子充填率, 緩衝板の寸法, ホウ素化合物を使用する場合の緩衝板および反応度調整材のほう素量, 燃料コンパクトの寸法</p>	<p>3又は10試料 あるいは10%</p>
C	<p>検査データのばらつきが判定基準の範囲も考慮して比較的大きい場合</p> 	<p>燃料核の直径, 被覆燃料粒子の直径, 燃料粒子被覆層厚さ, 燃料コンパクトの露出ウラン率, 燃料コンパクトのSiC層破損率</p>	<p>検査ロットの判定基準を統計的に保証するのに必要な数</p>

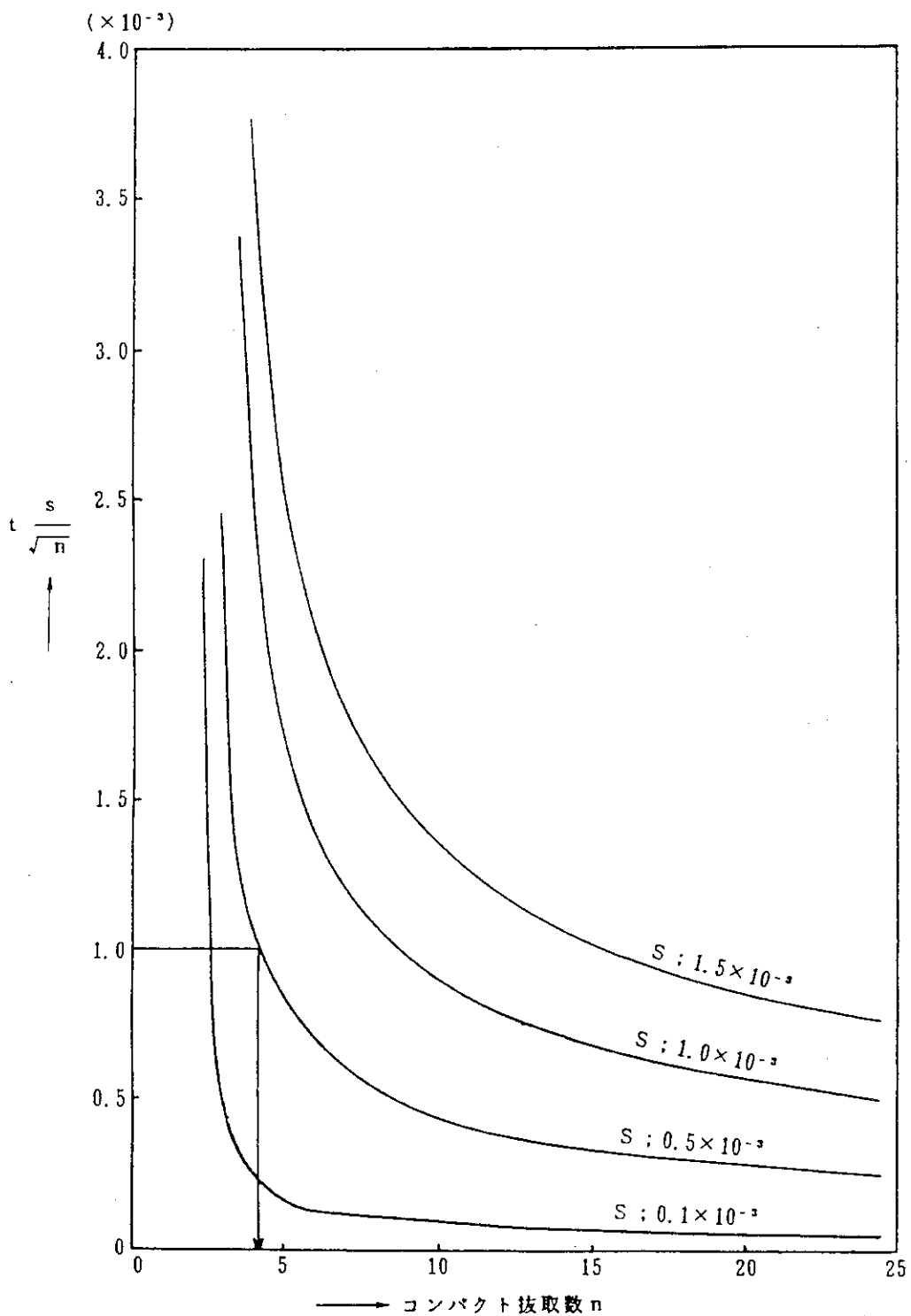
第3.3図 検査データのばらつきの程度による検査項目の分類

工程とロット又はバッチの区分け	ロット又はバッチの定義	1ロット又は1バッチの大きさの目安
 <p>(原料) ロット</p>	同一濃縮度ウラン原料の集まり	原料ロット 50~260kg U/ロット
 <p>(燃料核) バッチ</p>	燃料核製造のために小分けした集まり	燃料核バッチ 約 2 kg U/バッチ
 <p>(燃料核) ロット</p>	同一方法で製造された燃料核数バッチを混合した集まり	燃料核ロット 約 9~20kg U/ロット
 <p>(被覆) バッチ</p>	被覆粒子製造のために小分けした集まり	被覆バッチ 約 2~3 kg U/バッチ
 <p>(被覆粒子) ロット</p>	同一方法で製造された被覆粒子数バッチを混合した集まり	被覆粒子ロット 約 9~12kg U/ロット
 <p>(コンパクト) バッチ</p>	コンパクト製造のために小分けした集まり	コンパクトバッチ 約 200~300 個/バッチ
 <p>(コンパクト) ロット</p>	同一方法で製造されたコンパクトの集まり	コンパクトロット 約 700~800 個/ロット
<p>黒鉛粉末 及びバインダー</p> <p>(粉末) ロット</p>	同一方法で製造された黒鉛粉末又はバインダーの集まり	約 0.5~4 トン/ロット

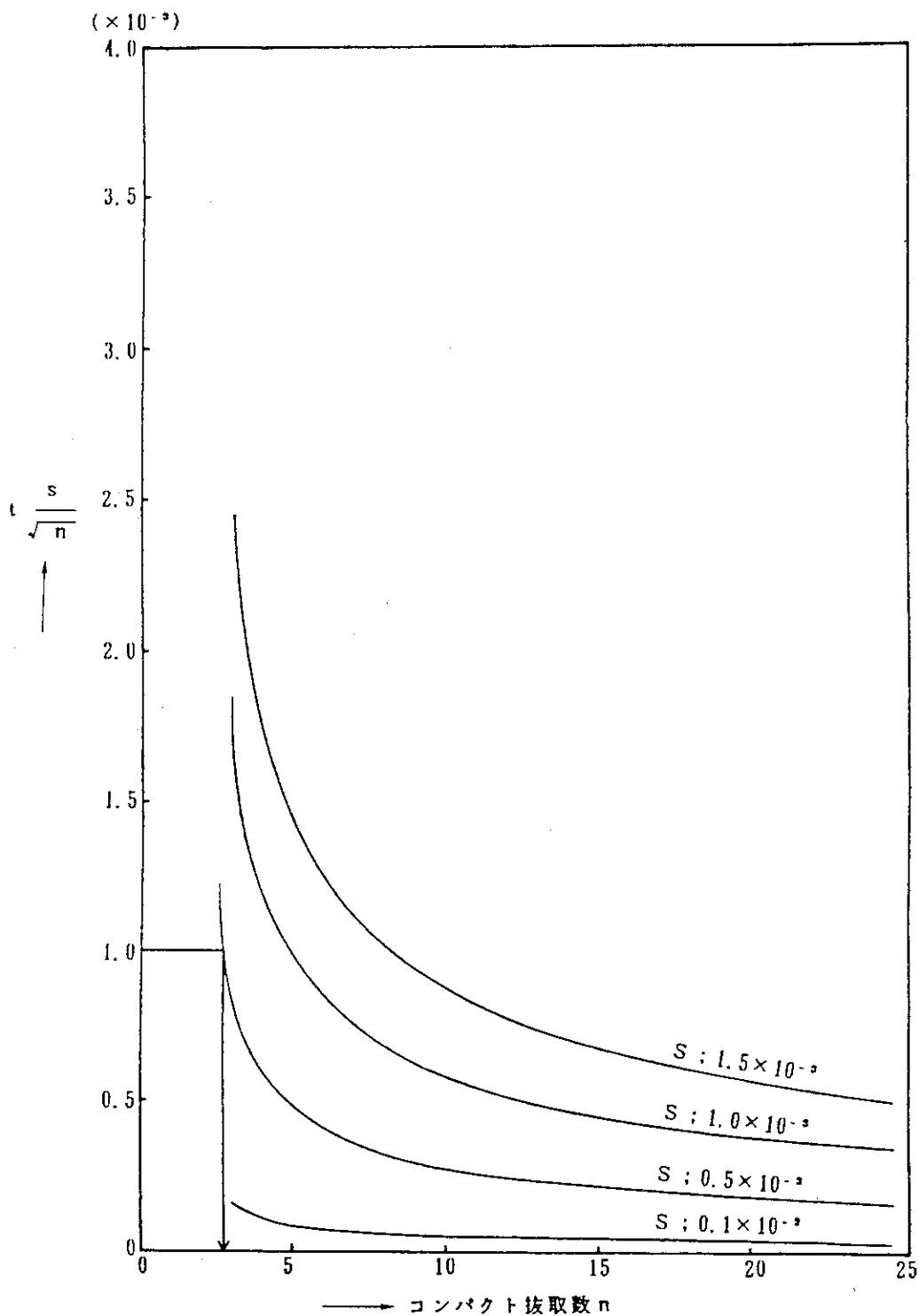
(注) 高温工学試験研究炉初装荷燃料について上記ロット等の数はおおよそ以下の通りである。

(原料) ロット	12
(燃料核) ロット	約 150
(被覆粒子) ロット	約 150
(コンパクト) ロット	約 150
コンパクト数	約 84,000

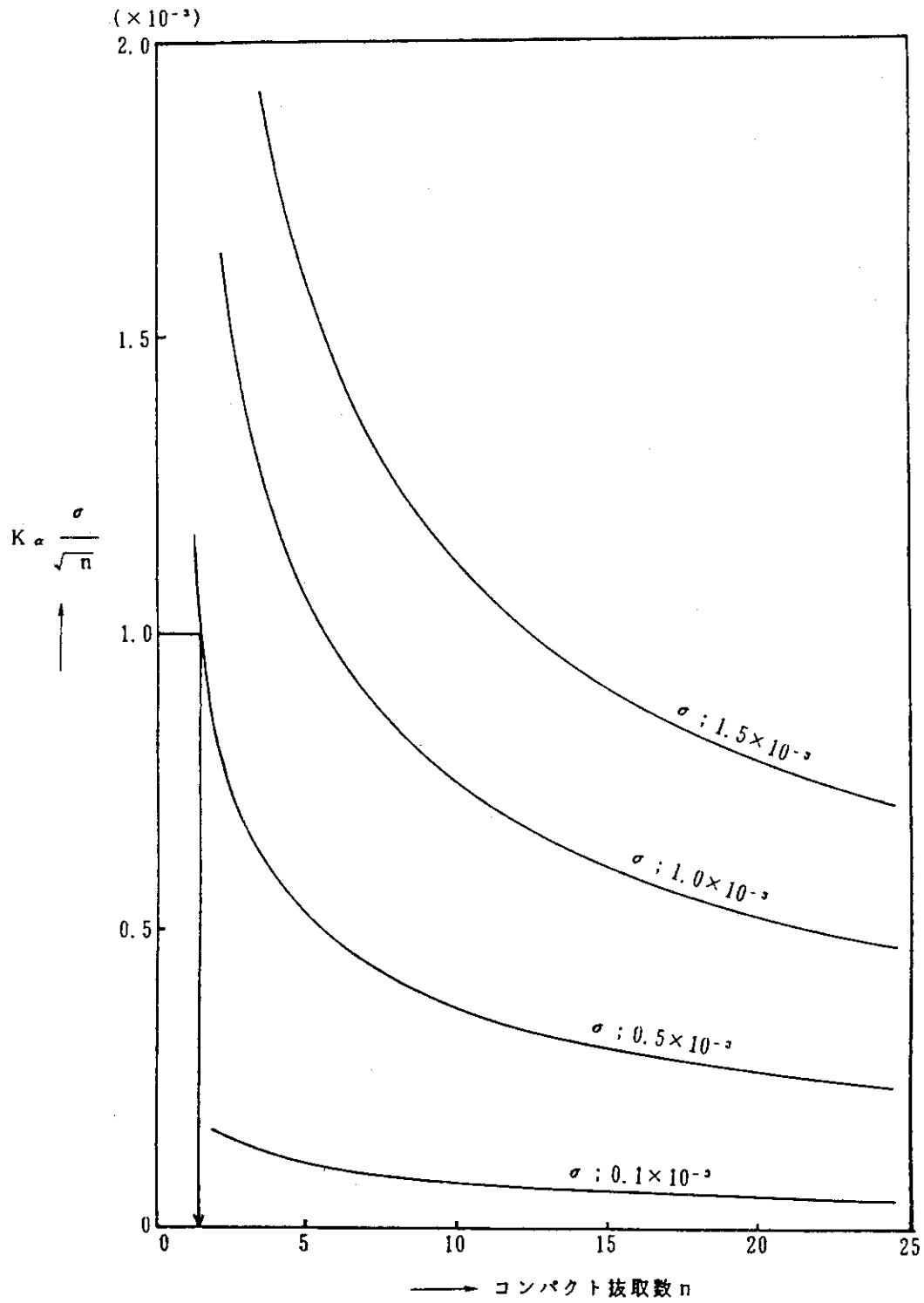
第3.4図 検査ロット及び製造バッチの大きさ



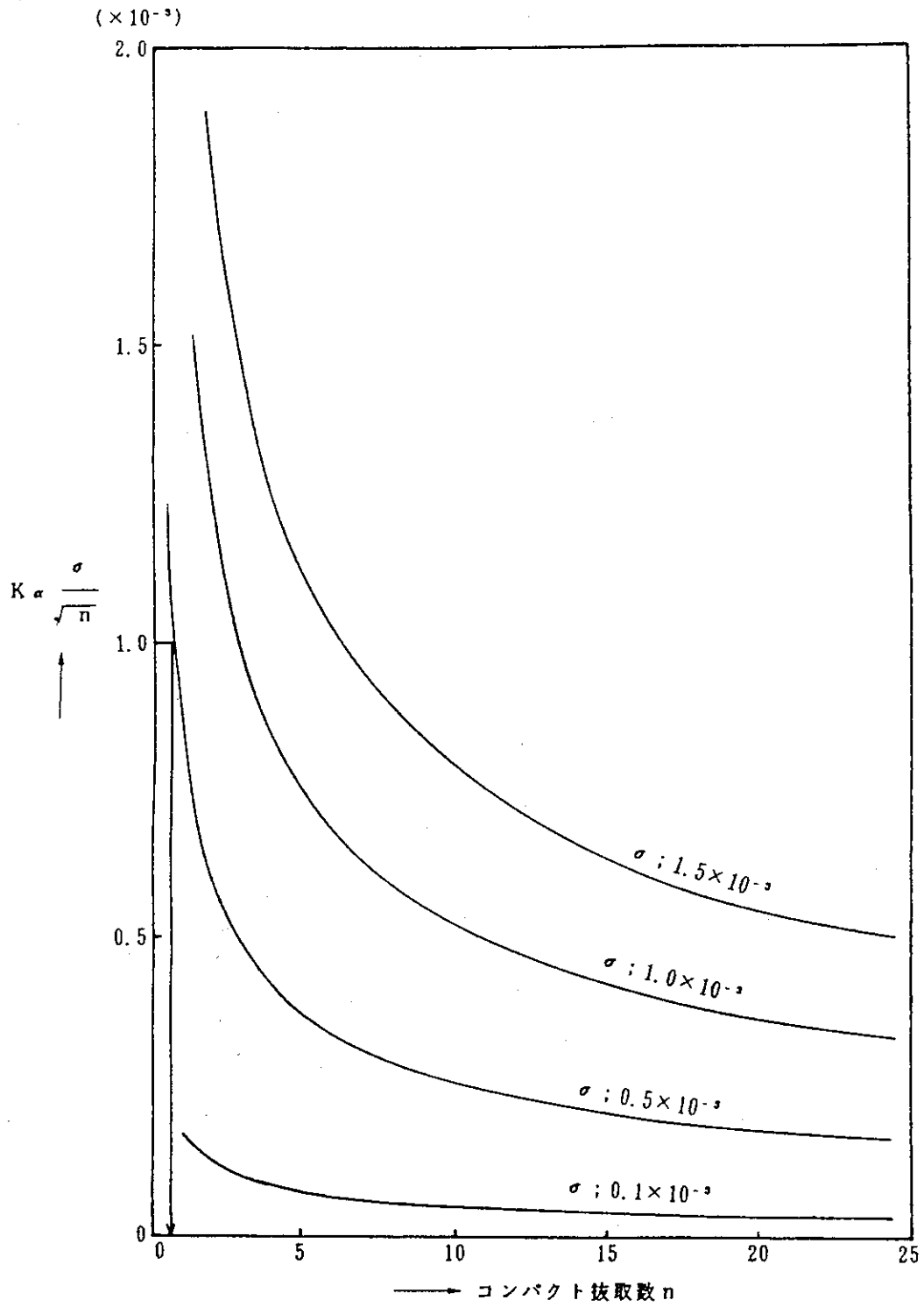
第3.5図 サンプル標準偏差 s をパラメータとした時の $t \frac{s}{\sqrt{n}}$ と n の関係 (信頼率99%)



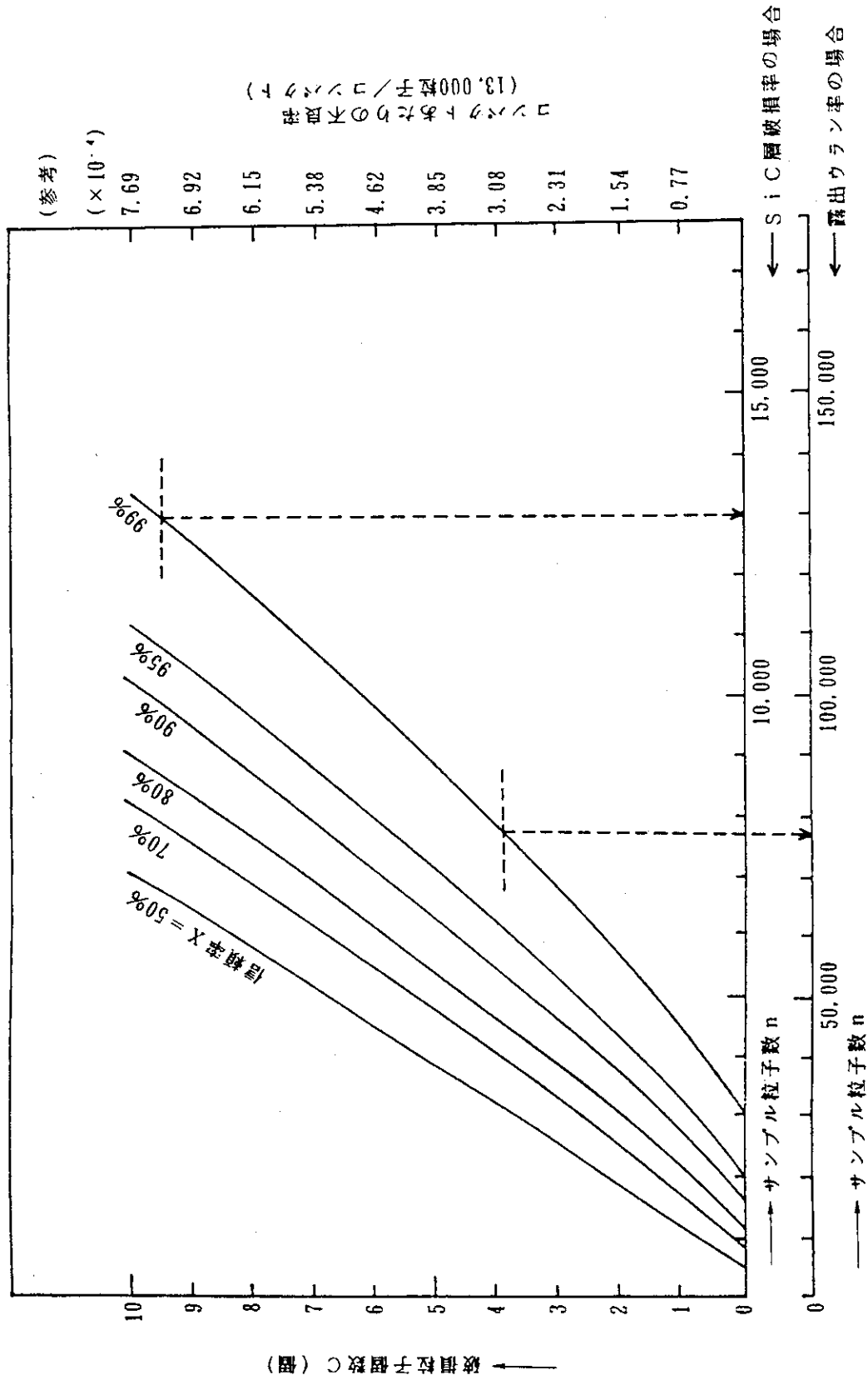
第3.6図 サンプル標準偏差 s をパラメータとした時の $t \frac{s}{\sqrt{n}}$ と n の関係
(信頼率95%)



第3.7図 母標準偏差 σ をパラメータとした時の $K_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ と n の関係
(信頼率99%)



第3.8図 母標準偏差 σ をパラメータとした時の $K_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ と n の関係
(信頼率95%)



第3.9図 露出ウラン率またはSiC層破損率を信頼率X%で合否判定するための不良個数Cとサンプル粒子数(抜取数) nの関係

4. 結 言

本検査基準は、日本原子力研究所が過去10年以上にわたり研究を進めてきた高温ガス炉燃料、海外の高温ガス炉の燃料等に関する知見を参考に作成したものであり、高温工学試験研究炉の初装荷燃料及び同炉に装荷する類似の燃料に対する「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく使用前検査基準の整備に係る技術的資料を提供できるものと考えられる。一方、高温工学試験研究炉は、わが国初めての高温ガス炉であり、高温工学試験研究炉の運転により、わが国における高温ガス炉用燃料の製造、検査に関する技術も一層向上して新しい検査方法が開発されたり、検査実績も十分蓄積されるものと思われる。また、今後、燃料に関する研究開発が進み、新しい概念に基づく燃料が開発されることも考えられる。これらの場合には、適切な時点で本検査基準の見直しが必要になると思われる。

謝 辞

本報告は、日本原子力研究所における約20年間にわたる高温ガス炉燃料の研究開発の成果をもとにして作成したものである。これらの研究開発は、燃料・材料工学部燃料照射研究室をはじめ日本原子力研究所内外の多くの方々の協力によって進めてきたものである。また、燃料の抜取検査基準に関して原子燃料工業(株)の鈴木修一氏並びに鈴木信幸氏、さらに東洋炭素(株)の豊田純二氏に有益な助言を頂いた。本報告書をまとめるにあたり高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三部長及び田中利幸次長に激励を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

4. 結 言

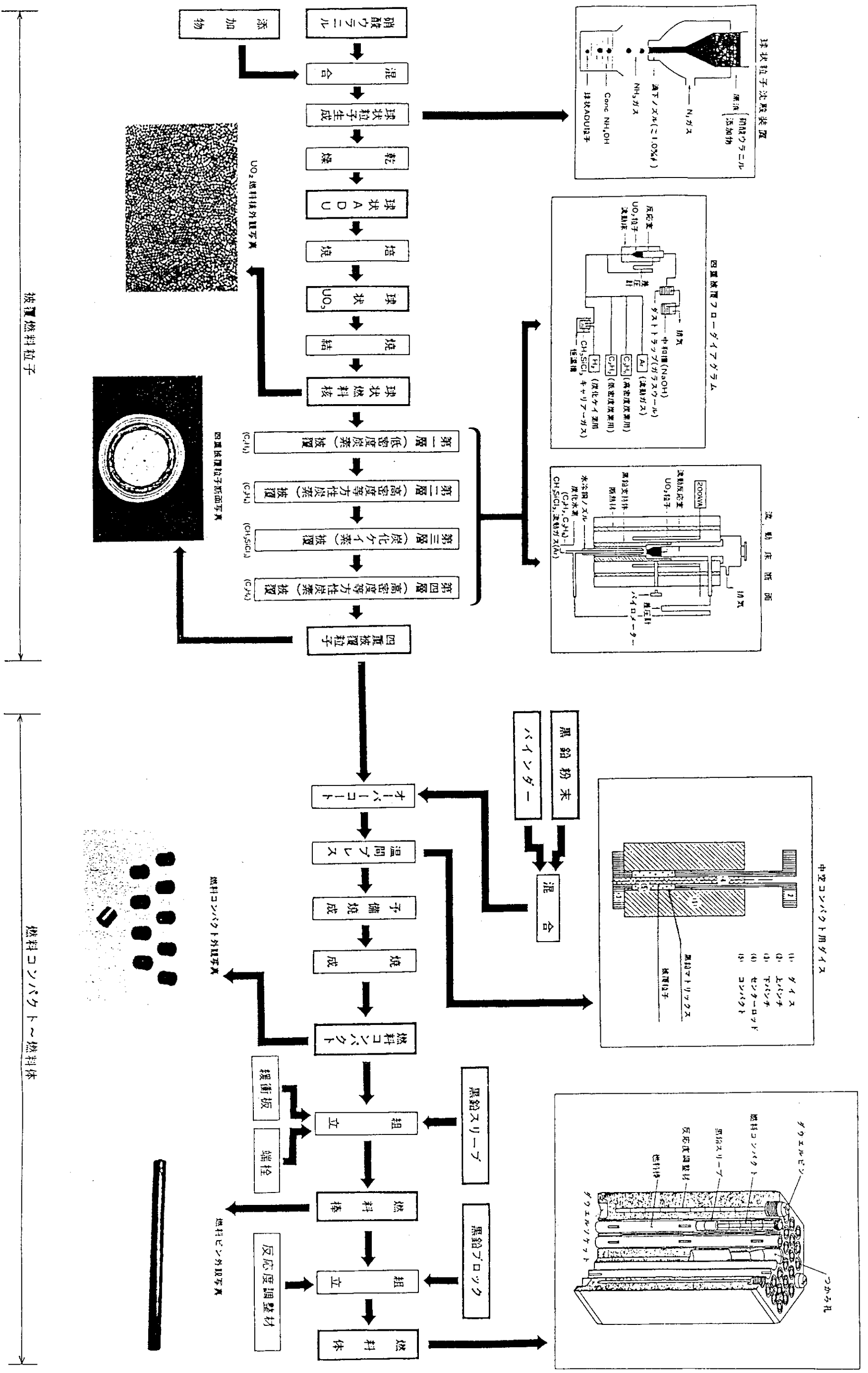
本検査基準は、日本原子力研究所が過去10年以上にわたり研究を進めてきた高温ガス炉燃料、海外の高温ガス炉の燃料等に関する知見を参考に作成したものであり、高温工学試験研究炉の初装荷燃料及び同炉に装荷する類似の燃料に対する「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく使用前検査基準の整備に係る技術的資料を提供できるものと考えられる。一方、高温工学試験研究炉は、わが国初めての高温ガス炉であり、高温工学試験研究炉の運転により、わが国における高温ガス炉用燃料の製造、検査に関する技術も一層向上して新しい検査方法が開発されたり、検査実績も十分蓄積されるものと思われる。また、今後、燃料に関する研究開発が進み、新しい概念に基づく燃料が開発されることも考えられる。これらの場合には、適切な時点で本検査基準の見直しが必要になると思われる。

謝 辞

本報告は、日本原子力研究所における約20年間にわたる高温ガス炉燃料の研究開発の成果をもとにして作成したものである。これらの研究開発は、燃料・材料工学部燃料照射研究室をはじめ日本原子力研究所内外の多くの方々の協力によって進めてきたものである。また、燃料の抜取検査基準に関して原子燃料工業(株)の鈴木修一氏並びに鈴木信幸氏、さらに東洋炭素(株)の豊田純二氏に有益な助言を頂いた。本報告書をまとめるにあたり高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三部長及び田中利幸次長に激励を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

付録 1 燃料の製造工程

高温工学試験研究炉被覆粒子燃料の燃料核から燃料体までの製造工程を付 1 . 1 図に示す。



付1.1図 燃料の製造工程

付 録 2 燃料の検査方法の詳細

高温工学試験研究炉の燃料検査方法の実際について以下に示す。

1. 燃料核の検査法

(1) ^{235}U 濃縮度分析

^{235}U 濃縮度の測定法には、質量分析法や γ 線スペクトル法（以下、 γ 線法と略す）がある。現在、日本原子力研究所で購入している被覆粒子燃料の ^{235}U 濃縮度管理は γ 線法によって行われている。この方法は、 ^{235}U から放出される γ 線の放射能強度から濃縮度測定を行うものである⁽¹⁾。測定精度は、高温工学試験研究炉燃料として考えられている3~10%濃縮のウランについて2 σ レベルで濃縮度の1%以下である⁽²⁾。測定方法を図1-1に示す。

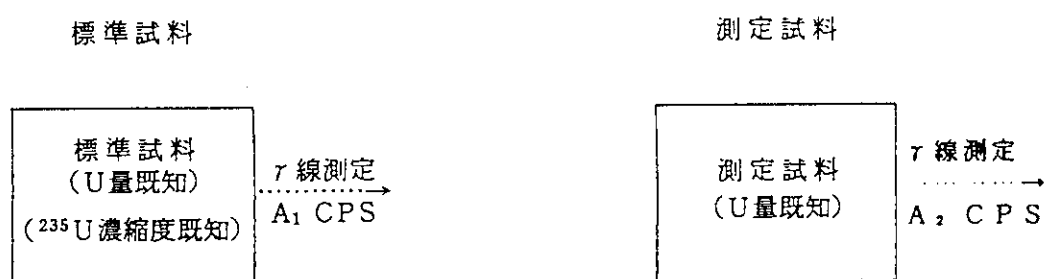


図1-1 濃縮度測定方法

ウラン量既知の測定試料を、図のようにウラン量および ^{235}U 濃縮度とも既知の標準試料と幾何学的形状を同じにし、その中に含まれる ^{235}U からの γ 線放射能と標準試料の γ 線放射能の比から測定試料の ^{235}U 濃縮度を求める。

文 献

- (1) H. OTTMAR, P. MATUSSEK, IAEA-SR-7/29 「In-process control of ^{235}U enrichment in an LWR fuel fabrication plant」
- (2) 私信 原子燃料工学誌、「酸化ウラン濃縮度分析方法」

(2) 燃料核直径の測定法

燃料核直径の測定は、対象物が小さい（直径 0.6mm）ことと、数が多い（1炉心に約 10^9 個の被覆燃料粒子が装荷される）ことのために特別な考慮を必要とする。日本原子力研究所において現在、使用されている自動粒径測定装置（以下、PSA法と略す）、X線ラジオグラフィ法及び金相試験について説明する。

① PSA法

本装置は、球状の被覆燃料粒子寸法を速やかにかつ、精度良く測定するためにオーストリアで開発されたもので、処理速度は20粒子/秒、測定精度は $800\mu\text{m}$ の標準球に対して数 μm 以下である。測定は、粒子に光を当て、その光量の変化から粒子寸法を測定する。その測定方法を図1-2に示す。

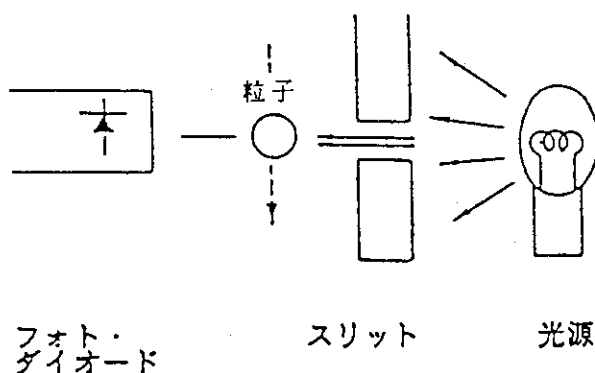


図1-2 PSA法（燃料核直径）

あらかじめ直径既知で真球度が近い標準粒子についてスリット通過時の光量の変化を測定しておく。

次に試料の光量変化を測定し、標準粒子との比較によって直径を求める。

PSA法と従来法（X線ラジオグラフィ）による測定結果の比較を図1-3に示す⁽¹⁾。

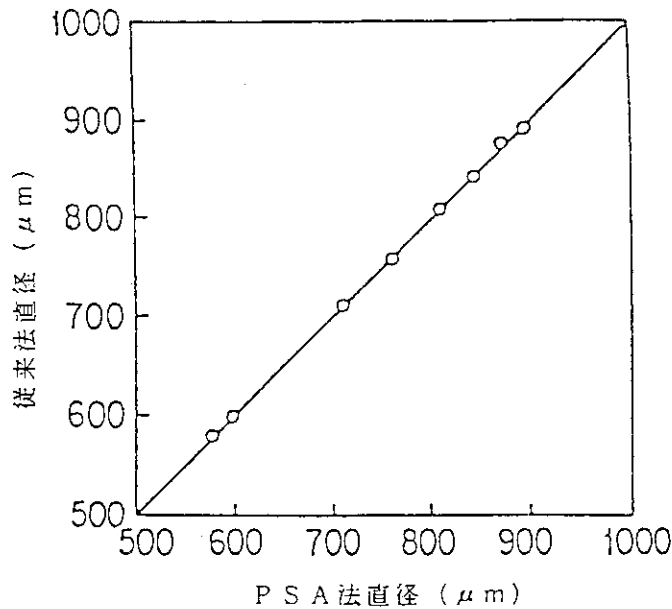


図1-3 従来法(X線ラジオグラフ法)とPSA法の比較

② X線ラジオグラフ法

X線ラジオグラフ法による燃料核直径の測定精度は、X線源と被写体との間隔、X線源の大きさ、X線フィルムの解像度等に依存するが、前の①で説明したPSA法と同程度の精度で測定することが可能である⁽²⁾。本方法は、X線写真を撮影した後、顕微鏡又は投影機で寸法測定をおこなうため、検査の時間はPSA法より必要となる。図1-4に、X線ラジオグラフ法による燃料核寸法測定の幾何学的精度の計算結果の例を、図1-5に被覆燃料粒子のX線ラジオグラフの例を示す。

③ 金相試験

本方法は、埋込み樹脂に検査対象の燃料核を埋込み、固化後、燃料核の中央部まで研磨を行う。寸法測定は顕微鏡または投影機で行う。この方法は、研磨した位置(深さ)が測定結果に影響を与えるので、できるだけ中央部付近まで研磨する必要がある。

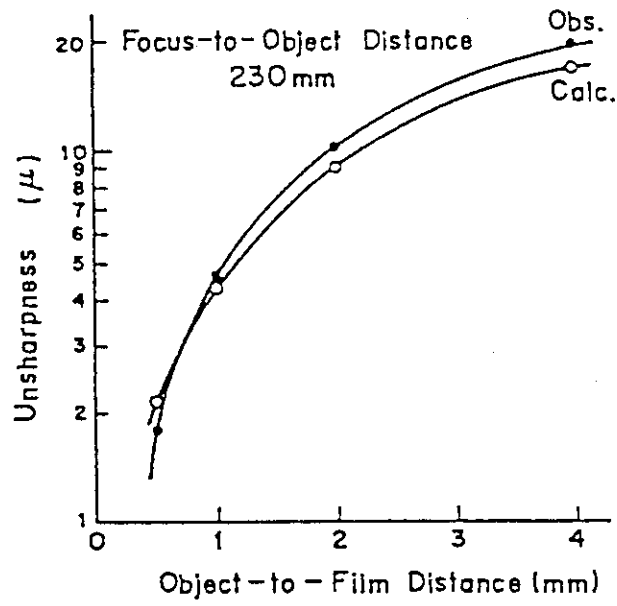


図1-4 不鮮明さに対する試料とフィルム間隔の効果

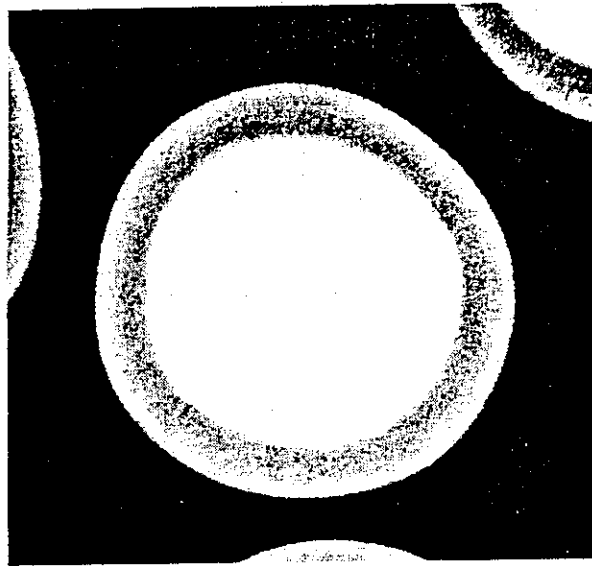


図1-5 被覆燃料粒子のX線ラジオグラフ

文 献

- (1) 鹿志村 悟, 他., JAERI-M 84-196 「被覆燃料粒子の自動寸法検査」1984
- (2) 鹿志村 悟, 他., JAERI-M 4749 「X線マイクロラジオグラフィによる被覆燃料粒子の非破壊検査」1972

(3) 燃料核の真球度測定法

燃料核の真球度は、直径の最大値と最小値の比として定義される。燃料核直径の測定法には「I(2)燃料核直径の測定法」に示したようにPSA法、X線ラジオグラフ法及び金相試験があり、これらの方法は真球度測定にも適用することができる。

① PSA法

燃料核直径は、1粒子について1回の測定であったが、同じ粒子を多数回測定すると、あらゆる方向の燃料核直径を測定することになる。このように測定した値から上の定義に従って真球度を求める。

図1-6にPSA法による真球度測定方法を示す。

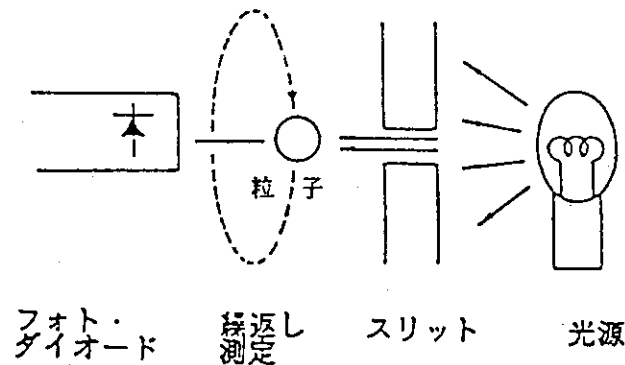


図1-6 PSA法(真球度)

② X線ラジオグラフ法及び金相試験

X線ラジオグラフ法及び金相試験による真球度測定は、燃料核の直径測定法と同じ手順で行われる。

(4) 燃料核の密度測定法

燃料核の密度(形状密度)を求めるには、その重量と体積を測定する必要がある。重量は天秤等によって測定される。一方、燃料核の表面には開気孔が存在するため、図1-7のように表面張力の大きい水銀を用いた「水銀置換法」によって、燃料核体積を測定する。以下に「水銀置換法」の一方法である水銀ピクノメータによる測定方法の概要を記す。

まず、試料容器に燃料核を入れて系全体の真空引きをする。次に真空引き口を閉じてピクノメータを傾斜させた状態でリーク穴から空気を導入すると大気圧のために下部の水銀は毛

細管を通して試料容器内に流入する。この状態で試料容器を取り出してその重量を測定する。試料を入れない場合について同様の測定を行い、それらの重量の差から燃料核の排除した水銀の重量が求められ、さらに燃料核の体積が求まる。

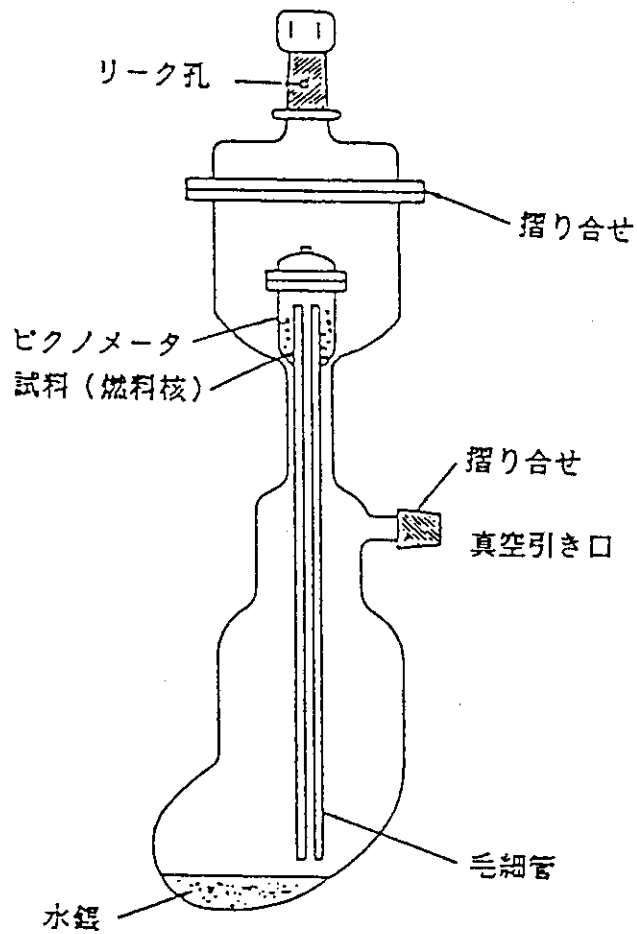


図1-7 燃料核密度測定用水銀ピクノメーターの概略図

2. 燃料粒子被覆層の検査法

(1) 被覆層厚さの測定法

燃料粒子被覆層厚さの測定方法は、「1(2)燃料核直径の測定法」に示したPSA法、X線ラジオグラフ法及び以下に記す金相試験による。金相試験は、検査対象の燃料粒子を樹脂に埋込み、固化後、燃料粒子の中央部まで研磨し、顕微鏡により各被覆層の厚さを測定する。いずれの方法も全ての燃料粒子被覆層に適用が可能である。

(2) 被覆層密度の測定法

第1層密度：測定方法は「1(5)燃料核の密度測定法」に示した水銀ピクノメータ法による。手順は検査試料（第1層被覆後の粒子）の重量、水銀ピクノメータによって体積、酸化重量法で二酸化ウラン量と炭素量を測定する。一方、検査試料に含まれる燃料核の密度 d は「1(5)燃料核の密度測定法」で求められているので燃料核の体積が得られ、先に測定した検査試料の体積との差が被覆層の体積となる。測定の手順を図2-1に示す。

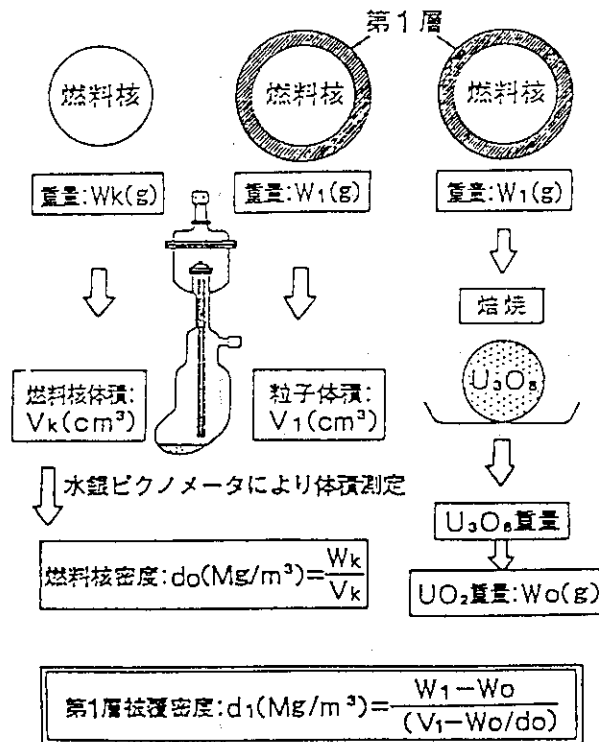


図2-1 水銀ピクノメータによる第1層密度検査

第2層密度 : 被覆第2層は、第1層の低密度熱分解炭素層表面の凹凸部に蒸着してあるので剥がれにくい。このため、図2-2に示すように第2層の一部を研磨によって採取し、浮遊沈降法により測定する方法が適用される。試料の採取法は第2層まで被覆した粒子を樹脂(ポリエステル系)に埋込み、固化後、研磨して第1層を完全に除去し、第2層のみになったことを顕微鏡で確認する。樹脂と試料の分離はN, N-ジメチルホルムアミドによって行い、採取した試料をテトラブロムエタン-ベンゼン等の重液を用いて浮遊沈降法で測定する。測定試料が重液中で一定時間浮遊することを確認した後、比重瓶を使用し、重液の密度を測定し、その値をもって試料の密度とする。

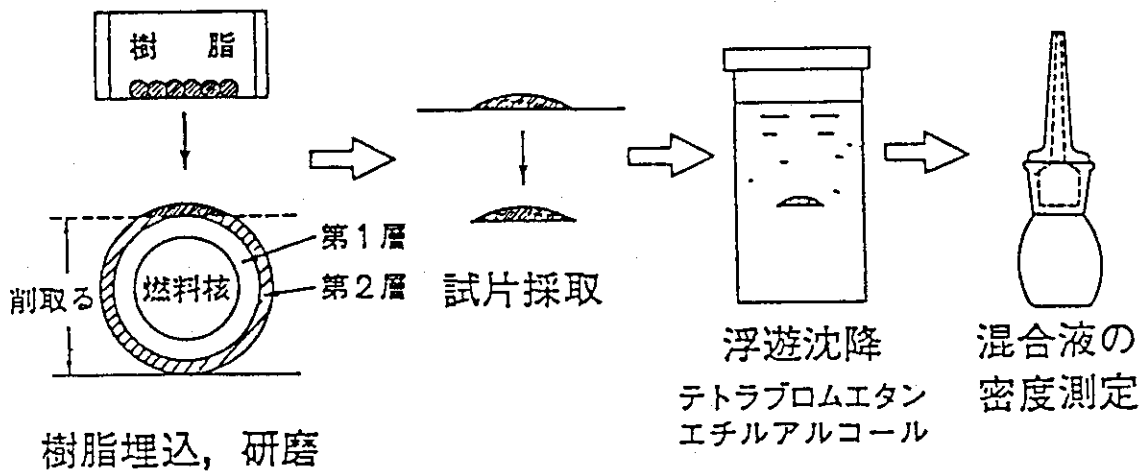


図2-2 浮遊沈降法による第2層密度検査

第3層密度 : 第4層まで被覆した被覆燃料粒子を機械的に破壊した後、空气中、約850℃で酸化する。その残渣を硝酸溶液で処理し、酸化ウランを溶解し、残った試片(SiC)を採取して検査試料とする。測定方法は第2層と同じ浮遊沈降法で、重液はヨウ化メチレン-ベンゼン等を使用する。測定手順を図2-3に示す。

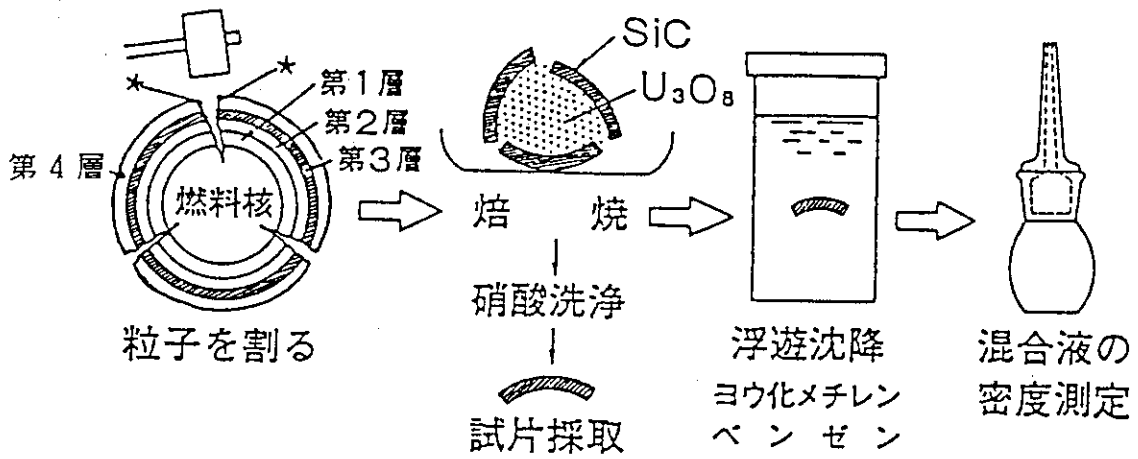


図2-3 浮遊沈降法による第3層密度検査

第4層密度 : 第4層まで被覆した被覆燃料粒子の体積を比重瓶(ピクノメータ)、重量を天秤で測定する。この試料を空气中、約850℃で酸化し、第4層を除去する。酸化後の重量を測定し、その体積を比重瓶で測定する。第4層の密度 d_4 の測定手順を図2-4に示す。

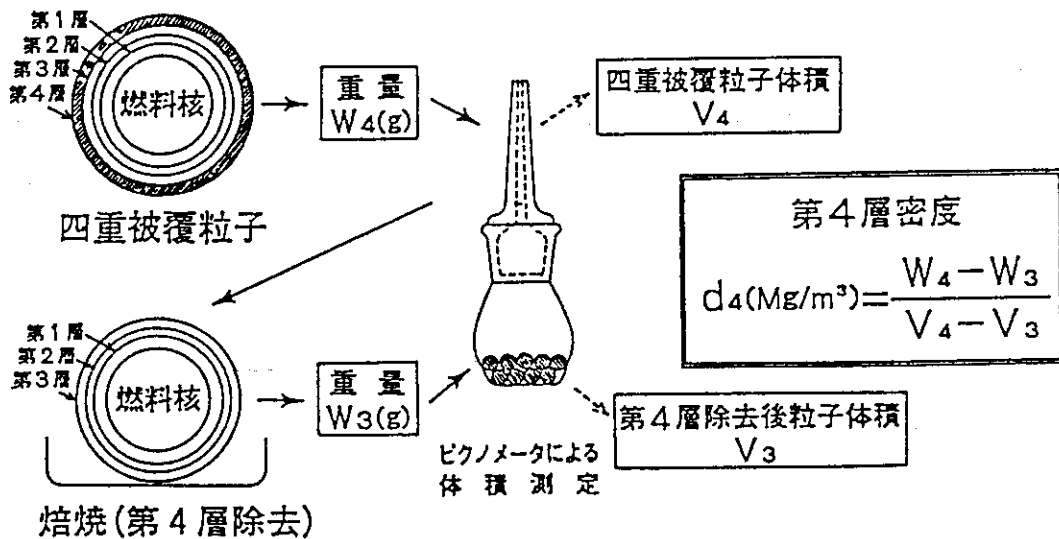


図2-4 液体置換法による第4層密度検査

(3) 高密度炭素層の光学的異方性因子 (OPTAF) 測定法

この方法は、光学による高密度熱分解炭素層の結晶子配向性の測定法として西独で開発された⁽¹⁾。検査は、樹脂に埋め込んだ被覆燃料粒子を赤道付近まで研磨し、研磨面に直径10~30 μ mの直線偏光を照射する。光を当てた状態で試料を回転させるか、又は試料を固定させて偏光の振動面を回転させて反射光量の変化を測定する方法による。光学的異方性因子 (OPTAF) とは、最小反射強度 (偏光の振動面が被覆燃料粒子では粒子外周と接線方向の値) と最大反射強度 (偏光の振動面が被覆燃料粒子では粒子外周と垂直方向の値) の比と定義する。光学的異方性因子の小さな熱分解炭素 (PyC) と光学的異方性因子の大きな熱分解黒鉛 (PG) について試料回転角度と反射強度との関係を図2-5に示す。図2-6に光学的異方性因子の異なる熱分解炭素試片の結晶子配向性をX線で測定した値 (BAF) と、本方法によって測定した値との関係を示す。ここで、 η_0 は黒鉛単結晶の光学的異方性因子であり、3.52を用いる。

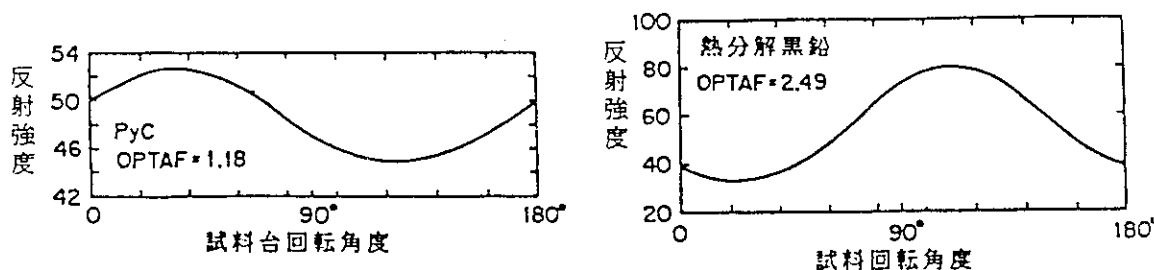


図2-5 試料回転角度と反射強度の関係

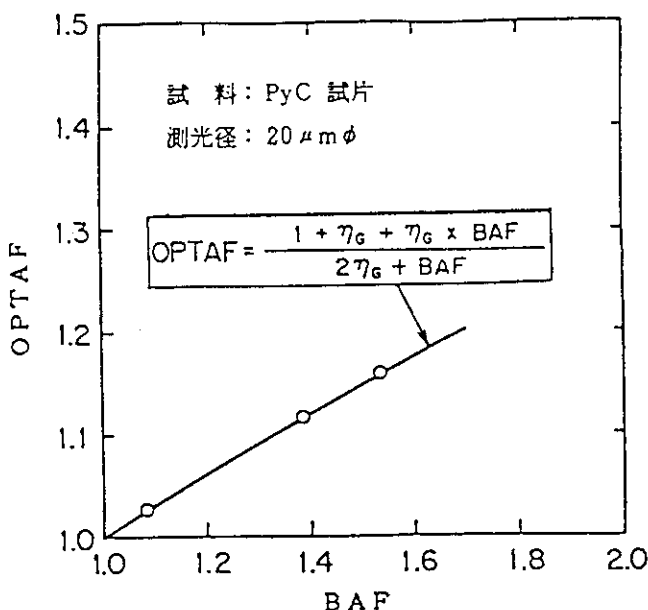


図2-6 BAFとOPTAFの関係

文 献

- (1) K. Koizlik, et al., "Influence of the Method of Measurement on the Optical Anisotropy Factor OPTAF of Pyrocarbon", JUL-1082-RW, 1974.

3. 燃料コンパクトの試験検査

(1) 不純物

化学分析法，放射化分析法等によって求める。

(2) ^{235}U 濃縮度

γ 線法又は質量分析法により求める。質量分析法では， ^{235}U 濃縮度が直接求められる。 γ 線法では， ^{235}U 量を γ 線スペクトル分析法（185keVの光電ピーク等を使用）で求め，ウラン量を化学分析法で求めることによって， ^{235}U 濃縮度を算出する。

(3) 燃料核のO/U比

燃料コンパクトを電気解砕した後，被覆燃料粒子を機械的に破砕して燃料核を選別し，酸化重量法又はポーラログラフィによって燃料核のO/U比を求める。

酸化重量法は， UO_{2+x} 試料を酸化して U_3O_8 とし，最終重量からウラン量を，重量変化からこの反応に必要な酸素の量を求めることによって，元の試料のウランと酸素の量を定める方法である。ポーラログラフィは， UO_{2+x} 試料をリン酸中に溶解して電圧をかけ，酸化・還元による電流値から4価及び6価のウランの量の比を求める方法である。

(4) 原料黒鉛粉及びバインダ

ミルシートの確認による。

(5) ウラン量

図3-1に示すように， ^{235}U 濃縮度既知の複数の燃料コンパクト標準試料について， γ 線スペクトル分析及び化学分析を行い，ウラン量の検量線を作成する。次に試料の γ 線スペクトル分析を行うことによって試料のウラン量を求める。

(6) 粒子充填率

図3-2に燃料コンパクトの現設計における組成を，図3-3にオーバーコート法の模式図を示す。

粒子充填率を求める為には，まずオーバーコートした被覆燃料粒子を一定量採取し（Aグラム），それからオーバーコート層を除去して被覆燃料粒子のみの重量を測定し（Bグラム），その比 B/A をもとめる。この時，粒子充填率は次式によって与えられる。

$$\text{粒子充填率} = \frac{v}{V} = \frac{M(B/A)}{Vd}$$

ただし，M：コンパクト製造に用いた全オーバーコート粒子の重量（g），

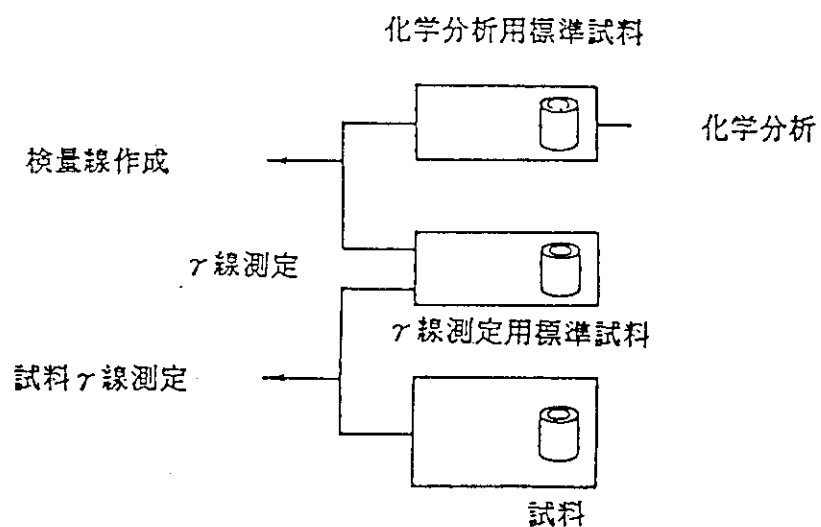


図3-1 ウラン量測定

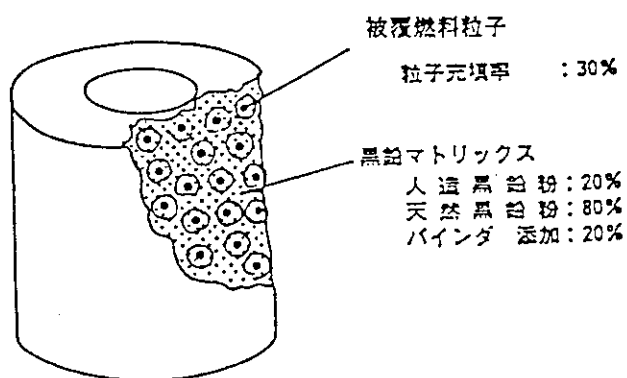


図3-2 燃料コンパクトの組成

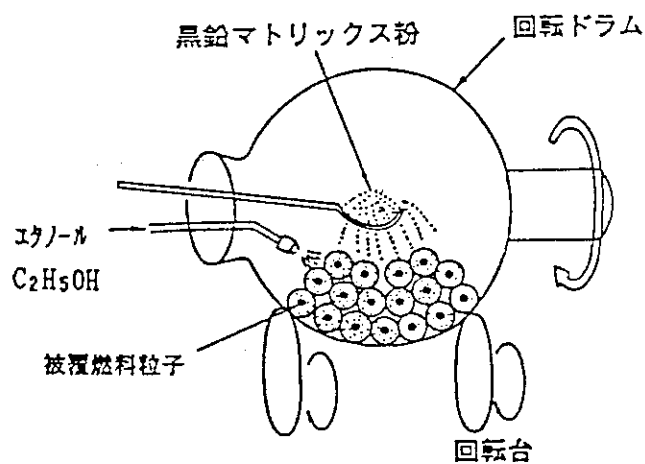


図3-3 被覆燃料粒子オーバーコート法

w : Mの中に含まれる被覆燃料粒子の重量 (g) ,

$$w = M (B / A) ,$$

d : 被覆燃料粒子密度 (g / cm³) ,

v : Mの中に含まれる被覆燃料粒子の体積 (cm³) ,

$$v = w / d = M (B / A) / d$$

V : コンパクトの全体積 (cm³) ,

である。Mは重量測定、Vは寸法からの計算によって求められる。また、被覆燃料粒子密度dは液体置換法によって求める。

(7) マトリックス密度

粒子充填率を求める際に用いた量から、次式によつて計算する。

$$\text{マトリックス} = \frac{\text{マトリックス重量}}{\text{マトリックス体積}} = \frac{M - w}{V - v}$$

各記号の意味は、粒子充填率の場合と同じである。

M : コンパクト製造に用いた全オーバーコート粒子の重量 (g) ;

w : Mの中に含まれる被覆燃料粒子の重量 (g) ,

V : コンパクトの全体積 (cm³) ,

v : Mの中に含まれる被覆燃料粒子の体積 (cm³) ,

(8) 露出ウラン率

定義は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{露出ウラン率} &= \frac{\text{コンパクト中の全浸出ウラン量}}{\text{コンパクト中の全ウラン量}} \\ &= \frac{\text{汚染ウラン量} + \text{破損粒子中のウラン量}}{\text{コンパクト中の全ウラン量}} \end{aligned}$$

図3-4に示すような装置を用いて、燃料コンパクトを硝酸水溶液中で電気化学的に解砕する。解砕された被覆燃料粒子及び黒鉛マトリックス粉末を分離し、同じく硝酸水溶液中で煮沸して露出ウランを浸出 (leach) させる。浸出ウラン量をアルセナゾーⅢ法、ウラン蛍光分析法などの化学分析法によって求め、上で求めたウラン量を用いて上式により露出ウラン率を算出する。

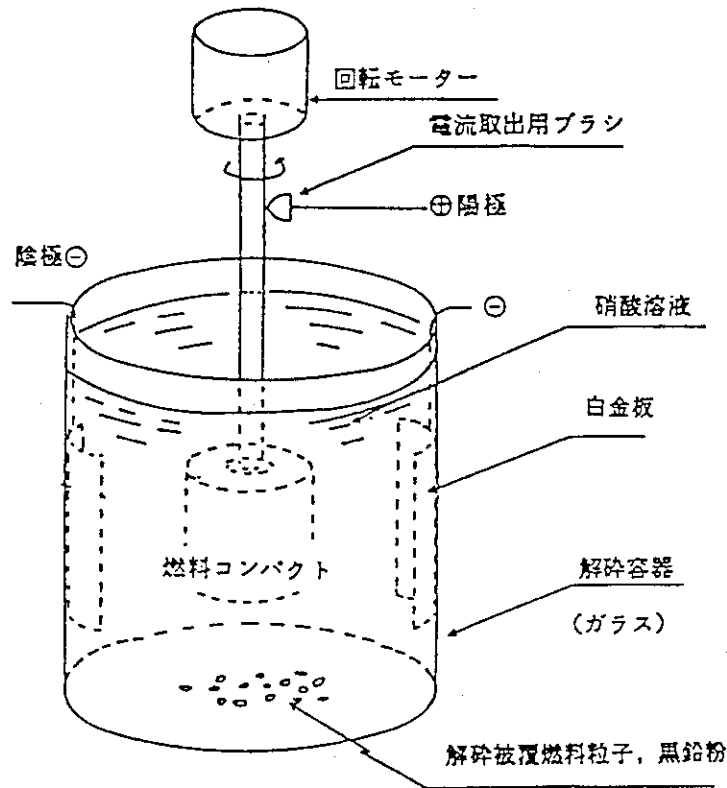


図3-4 燃料コンパクト解砕装置

(9) SiC層破損率

定義は以下のとおりである。

$$\text{SiC層破損率} = \frac{\text{SiC層破損粒子中のウラン量}}{\text{コンパクト中の全ウラン量}}$$

燃料コンパクトを空气中で燃焼させ（約 850℃で20時間程度）、黒鉛マトリックス及び被覆燃料粒子最外被覆層を除去する。この過程において、SiC層に破損のある被覆燃料粒子は、燃料核のUO₂がU₃O₈に酸化されて膨張し、クラックが拡大するため、その後硝酸水溶液中で煮沸すると燃料核のウランが浸出される。しかし、健全SiC被覆層を持つ被覆燃料粒子からはウランは浸出されない。浸出されたウラン量を化学分析法によって求め、上式によって、SiC層破損率を算出する。

4. 黒鉛スリーブの試験検査法

(1) 黒鉛スリーブの主要寸法

黒鉛スリーブの概略形式及び主要寸法は図4-1のとおりである。

長さ : L

底厚 : t

外径 : D

内径 : d

スペーサ高さ : h

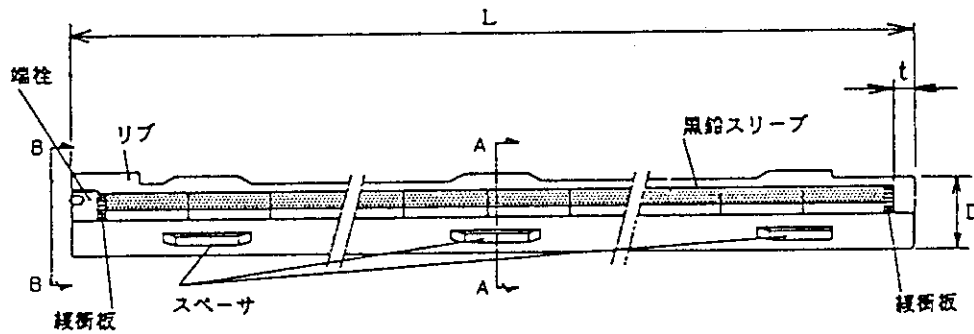


図4-1 黒鉛スリーブ

(2) 真直度

「定盤法による真直度の測定」

図4-2に示すように黒鉛スリーブを定盤上で横にし、下部を定盤に付けた状態で黒鉛スリーブ上部と定盤のギャップを測定する。

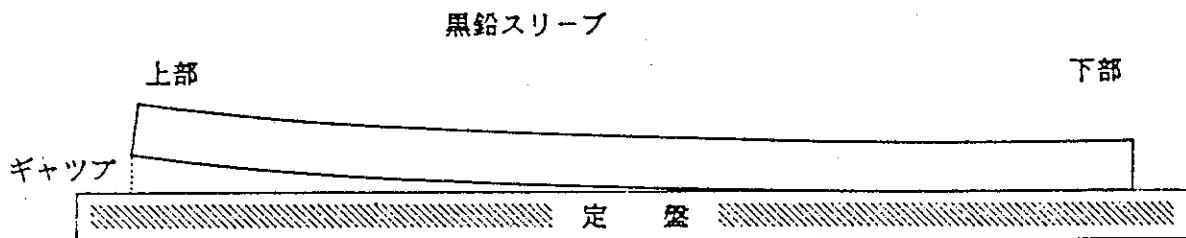


図4-2 定盤法 (真直度)

5. 黒鉛ブロックの試験検査法

(1) 主要寸法

黒鉛ブロックの主要寸法は図5-1のとおりである。

高 さ : L

対面間距離 : l

燃料棒そう入孔直径 : d_1

反応度調整材装荷孔直径 : d_2

つかみ孔直径 : d_3

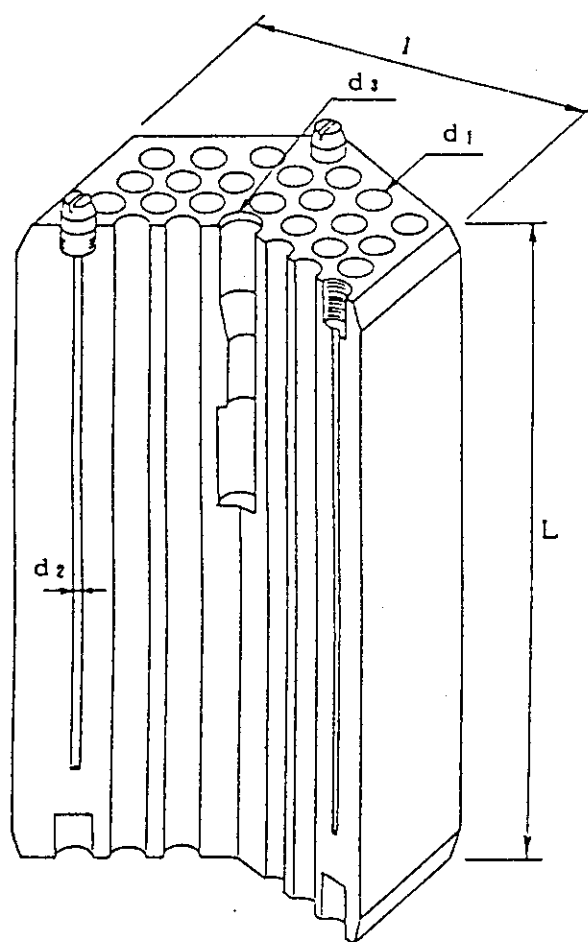


図5-1 黒鉛ブロック

(2) 直角度

黒鉛ブロックの直角度は下部端面を基準として側面の直角度を測定する。測定法を図5-2に示す。

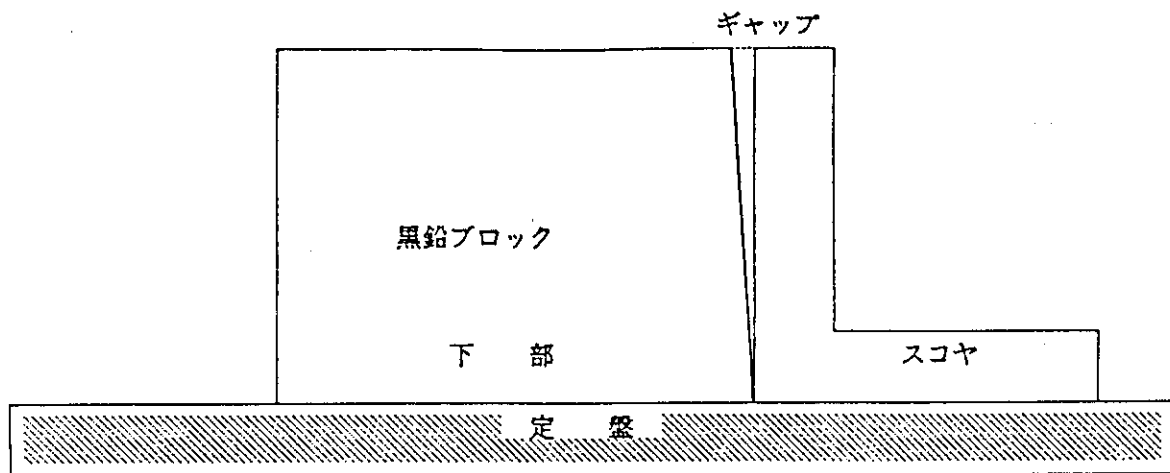


図5-2 定盤法（真直度）

付 録 3 判定基準の具体的な目安

本文「2.1 燃料検査基準」に示した判定基準には、設計上の仕様を満たすこと、実用上差し支えないこと等の具体的な数値を記載していない項目が含まれている。これは、将来の原子炉への適用を考慮して、検査基準にある程度の普遍性を持たせるためである。

本報告は、それらの項目を含め、全ての検査項目について、判定基準の具体的な目安を参考のために示す。なお、これらの目安の数値等は、現時点における炉設計に基づく概略値であり、本検査基準を作成する上で参考としたものである。従って、将来の高温工学試験研究炉の「設計及び工事の方法の認可」の申請の際に採用する数値等とは必ずしも同一ではない。

付1.1表 判定基準の具体的な目安

(1) 燃料核

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
^{235}U 濃縮度	設計上の仕様を満たすこと。	規定値に対する偏差は、規定値の $\pm 4.5\%$ 以内とする。
直径	設計上の仕様を満たすこと。	$600 \pm 75 \mu\text{m}$ (2σ)
真球度	1.0からの偏差が著しく大きくないこと。	最大直径と最小直径の比が1.2を超えないものが90%以上
密度	偏差は著しく大きくないこと	規定値からの偏差は、理論密度で表して $\pm 3\%$ とする。 (理論密度は、O/U比が2.00時の値)
不純物	実用上、差し支えないこと。	$\text{C} \leq 300\text{ppm}$ 、 $\text{Fe} \leq 500\text{ppm}$ $\text{Ca} \leq 200\text{ppm}$ 蒸発性不純物 $\leq 80 \mu\text{g/g UO}_2$
O/U比	偏差は著しく大きくないこと	1.99~2.02の範囲にあること。

(2) 燃料粒子被覆層

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
被覆層厚さ (第1層~第4層)	設計上の仕様を満たすこと。	第1層 $60 \pm 36 \mu\text{m}$ (2σ) 第2層 $30 \pm 12 \mu\text{m}$ (2σ) 第3層 $17 \mu\text{m}$ 以上 (2σ) 第4層 $45 \pm 20 \mu\text{m}$ (2σ)
密度 (第1層~第4層)	偏差は著しく大きくないこと	第1層 $1.10 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$ 第2層 $1.85 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$ 第3層 $\geq 3.18 \text{ g/cm}^3$ 第4層 $1.85 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$
光学的異方性因子 (第2層, 第4層)	1.0からの偏差が著しく大きくないこと。	≤ 1.04 (5粒子以上 \times 4箇所の測定値の平均)

(3) 被覆燃料粒子

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
直径	設計上の仕様を満たすこと。	$920^{+100}_{-80} \mu\text{m}$ (2σ)
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	拡大鏡等の検査で、著しい割れ、欠け及び付着物が認められないこと。
断面組織	実用上、差し支えないこと。	検査粒子全てが正常に被覆されていること。

(4) 燃料コンパクト

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
不純物	設計上の仕様を満たすこと。	ほう素当量 $\leq 5\text{ppm}$
^{235}U 濃縮度	設計上の仕様を満たすこと。	他の濃縮度のものと区別できること
O/U比	偏差は著しく大きくないこと	1.99~2.02の範囲にあること。
原料黒鉛粉末の種類	実用上、差し支えないこと。	黒鉛の種類、密度、不純物、粒径等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異ならないこと。
バインダの種類	実用上、差し支えないこと。	バインダの種類、化学組成、灰分、融点等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異ならないこと。
ウラン量	設計上の仕様を満たすこと。	$13.5\text{g} \pm 5\%$
露出ウラン率	設計上の仕様を満たすこと。	$\leq 1.5 \times 10^{-4}$
SiC層破損率	設計上の仕様を満たすこと。	$\leq 1.5 \times 10^{-3}$
粒子充填率	偏差は著しく大きくないこと	規定値からの偏差が3vol%以内であること。
マトリックス密度	偏差は著しく大きくないこと	$1.70 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$
主要寸法	設計上の仕様を満たすこと。	外径 $26.0 \pm 0.1\text{mm}$ 内径 $10.0 \pm 0.1\text{mm}$ 長さ $39.0 \pm 0.5\text{mm}$
外観	表面に有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(4) 燃料コンパクト (続き)

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
マーキング	規定の濃縮度に対応したマーキングが施してあること。	同左
圧縮破壊強度	実用上、差し支えないこと。	これまでの製造実績に基づく値と著しく異なること。

(5) 黒鉛スリーブ

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
黒鉛の種類	実用上、差し支えないこと。	黒鉛の種類、密度、引張り強度、不純物等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異なること。 (「黒鉛検査基準」による。)
主要寸法	設計上の仕様を満たすこと。	円筒部 長さ 577±0.5mm (黒鉛ブロック内に収まること) 外径 34±0.1mm 内径 26.25±0.1mm 底厚 10 ⁺¹ ₋₀ mm スペーサ 高さ 3.4±0.2mm 位置 長さ方向 3ヶ所 周方向 3ヶ所 計 9ヶ所 (図面により指定した位置に配置していること)
真直度	実用上、差し支えないこと。	燃料棒に組立てた後、支障なく燃料体に組立てられること。 (1/2000以下)
外 観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(6) 端栓

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
黒鉛の種類	実用上、差し支えないこと。	(5) 黒鉛スリーブ(黒鉛の種類)に同じ。
主要寸法	実用上、差し支えないこと。	支障なく燃料棒に組立てられること
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(7) 緩衝板

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
素材の種類	実用上、差し支えないこと。	素材の種類、緩衝機能(通常の輸送及び取扱時に受ける荷重を緩和する機能)、熱処理温度等がこれまでの製造実績に基づく値と著しく異ならないこと。
不純物	設計上の仕様を満たすこと。	特に規定せず。但し、緩衝板にほう素化合物を混入する場合は、ほう素量の検査を不純物の検査に代える。
主要寸法	実用上、差し支えないこと。	支障なく燃料棒に組立てられること
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(8) 燃料棒

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
ウラン量	設計上の仕様を満たすこと。	189g±3%
全長	設計上の仕様を満たすこと。	577±0.5mm (黒鉛ブロック内に収まること)
スタック長さ	設計上の仕様を満たすこと。	546±1mm (燃料棒内にコンパクト及び緩衝板が収まること)
表面汚染	実用上、差し支えないこと。	0.004 Bq/cm ² 以下
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。
²³⁵ U濃縮度	規定の ²³⁵ U濃縮度の燃料コンパクトが装荷されていること。	規定の ²³⁵ U濃縮度に対応したマーキングを有する燃料コンパクトが装荷されていること。
部品構成検査	部品の欠如のないこと。	同左
マーキング	規定の濃縮度に対応したマーキングが施してあること。	同左

(9) ダウエルピン

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
黒鉛の種類	実用上、差し支えないこと。	(5) 黒鉛スリーブ (黒鉛の種類) に同じ。
主要寸法	実用上、差し支えないこと。	支障なく燃料体に組立てられること
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(10) 黒鉛ブロック

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
黒鉛の種類	実用上、差し支えないこと。	(5) 黒鉛スリーブ(黒鉛の種類)に同じ。
主要寸法	設計上の仕様を満たすこと。	高さ 580±0.5mm 対面間距離 360±0.2mm 燃料棒そう入孔直径 41 ± 0.3 mm 燃料棒そう入孔位置 燃料棒そう入孔数は31個又は33個とし、図面により指定した位置に配置されていること。 ダウエル孔位置 ダウエル孔数は3個とし、図面により指定した位置に配置されていること。
直角度	設計上の仕様を満たすこと。	0.2mm以下
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(11) 反応度調整材

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
素材の種類	実用上、差し支えないこと。	従来のもので著しく異なること
主要寸法	実用上、差し支えないこと。	支障なく燃料体に組立てられること
ほう素量	設計上の仕様を満たすこと。	ほう素含有率 A型 2.0 ± 0.4 wt% B型 2.5 ± 0.4 wt%
外観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。

(12) 燃料体

検査項目	判定基準	判定基準の具体的な目安
^{235}U 濃縮度	規定の ^{235}U 濃縮度の燃料棒が装荷されていること。	規定の ^{235}U 濃縮度に対応したマーキングを有する燃料棒が装荷されていること。
部品構成検査	部品の欠如のないこと。	黒鉛ブロック、燃料棒及びダウエルピンの欠如がないこと。反応度調整材の有無が規定どおりであること。
外 観	有害な割れ、欠け、付着物等のないこと。	割れや欠けの形状や大きさ及び付着物は多種多様であるので、一律に規定を設けないこととし、限界見本等により判断する。
ウラン量	設計上の仕様を満たすこと。	6.23kg \pm 3% (燃料棒33本型) 5.85kg \pm 3% (燃料棒31本型)