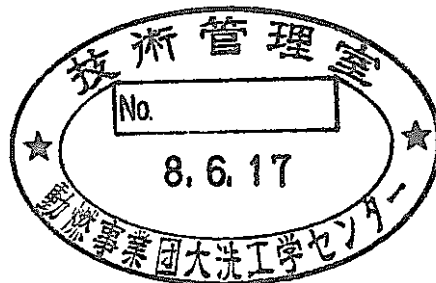


炉内中性子検出器照射試験の予備的検討

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1996年3月



株式会社 東 芝

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1996年3月

炉内中性子検出器照射試験の予備的検討

滝田雅美*、 泉幹雄***

小川不二雄*、 佐藤孝男**

要 旨

FBR実証炉では、広域系中性子検出器を炉容器内の高温ナトリウム中で使用することを想定しており、高感度で高温下においても安定した作動特性を有する信頼性の高い広域系中性子検出器を開発する必要がある。これまで、広域系中性子検出器として、従来の核分裂計数管の高感度化、耐高温性向上をめざした開発が進められており、試作、試験を通じて基本特性を確認する炉外試験が終了している。しかしながら、広域系中性子検出器の健全性確認のためには照射温度及び積算照射量等の実証炉実機の使用条件を模擬した照射試験による検証が不可欠である。

本検討では、実証炉用広域系中性子検出器の照射試験計画の予備検討として、広域系中性子検出器の照射試験の必要性、優先度をまとめ、「常陽」で照射試験を実施する場合の中性子検出器設置位置等の検討を行なった。その結果、照射場所としては炉心第3列のCRD予備穴とすることが効果的であるが、軸方向の中性子束勾配が大きいことから、限られた期間で軸方向に長い中性子検出器の全長に渡って実証炉の照射条件を満足させるためには、中性子検出器の照射試験に加え、中性子検出器を構成する要素の試験体照射が必要であることが分かった。また、中性子検出器照射試験装置の概念設計として、径の異なる中性子検出器でも照射できるような照射試験装置の構成、構造等について検討を行い、更に2種類の検出器を同時に照射試験できるような概念図を作成した。また、概略の放射化量の評価を含め、中性子検出器の取扱い方法について検討を行い、概念図を作成した。最後に今後の検討課題を抽出し「常陽」で照射試験を行う上での概略工程を策定した。

本報告書は、(株)東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約に基づいて実施した業務の成果である。

契約番号；07C3365

事業団担当部課；大洗工学センター、実験炉部技術課

事業団担当者；青山卓史

*) (株)東芝 磯子エンジニアリングセンター 動力炉開発部

***) (株)東芝 京浜事業所 原子炉機器部

****) (株)東芝 原子力技術研究所 電子応用システム担当

March, 1996

Preliminary Study on In-vessel Neutron Detector Irradiation Test in JOYO

Masami TAKITA*, Mikio IZUMI***

Fujio OGAWA*, Takao SATO**

ABSTRACT

In Demonstration Fast Breeder Reactor (D-FBR), the wide range neutron monitor is planned to be used at high sodium temperature in the reactor vessel. Therefore, the detector has to be sensitive and stabilized under high temperature environment. Up to present, the fission chamber has been developed as the wide range neutron monitor for D-FBR with high sensitivity and temperature endurance, and a series of fundamental characteristics tests out of reactor were conducted. To confirm sensitivity and endurance of the detector, irradiation test is indispensable which simulates the D-FBR conditions such as irradiation temperature and total fluence.

In this report, as a preliminary study on in-vessel neutron detector irradiation test, necessity and priority of the irradiation test is described. This test is planned at the experimental fast reactor "JOYO", and it was found that irradiation location is suitable at the CRD reserved hole in the third row of the JOYO Mark-III core. However, there is a large flux gradation along the axial direction, neutron fluence at the top can't satisfy that of D-FBR within a definite of time. So, the element (parts of the detector) irradiation test is also needed at the lower position. And an example of the irradiation test devices is shown and the detector handling methods are examined.

Work performed by Toshiba Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC

Takafumi AOYAMA

*: Advanced Reactor Engineering Dept., Toshiba Corporation

** : Nuclear Energy Equipment Manufacturing Dept., Toshiba Corporation

***: Electronic System Technology Group, Nuclear Engineering Laboratory,
Toshiba Corporation

目 次

要 旨

Abstract

目 次

図表リスト

1. はじめに	1
2. 照射試験計画の検討	2
2.1 FBR実証炉向け広域系中性子検出器	2
2.2 照射計画	6
2.2.1 検出器照射試験検討	6
2.2.2 常陽での照射試験検討	10
2.2.3 照射試験時の取得データの検討	29
3. 照射試験装置の概念設計	31
3.1 照射試験装置の構成	31
3.2 照射試験装置の概念設計	31
3.2.1 構造検討	31
3.2.2 検出器取扱い方法の検討	32
3.3 放射化量の概略検討	33
4. 今後の課題	45
5. 試験工程の策定	46
6. まとめ	49
謝 辞	
引用文献	
添付資料 - 1	
参考資料	
- 広域系中性子検出器炉外試験結果例 -	

図リスト

- 図 2.1-1 FBR 実証炉の中性子検出器設置位置概念図
- 図 2.2-1 広域系中性子検出器の開発経緯
- 図 2.2-2 広域系中性子検出器の実証炉への達成度概念図
- 図 2.2-3 照射試験用中性子検出器外形図
- 図 2.2-4 第3列の全中性子束
- 図 2.2-5 第3列の中性子束
- 図 2.2-6 第3列と第5列の中性子束
- 図 2.2.7 要素試験概念図
- 図 3.1-1 炉内中性子検出器照射試験装置全体概念図
- 図 3.2-1 CRD 予備穴取合図
- 図 3.2-2 炉内中性子検出器照射試験装置本体全体図
- 図 3.2-3 炉内中性子検出器照射試験装置本体下部詳細図
- 図 3.2-4 炉内中性子検出器照射試験装置中性子検出器組立と保持管組立
- 図 3.2-5 炉内中性子検出器照射試験装置（1体収納型）
- 図 3.2-6 炉内中性子検出器照射試験装置案内管取扱図
- 図 3.2-7 下部案内管取扱機キャスク全体組立図
- 図 5.1-1 中性子検出器照射試験工程（2体個別照射）
- 図 5.1-2 中性子検出器照射試験工程（2体同時照射）

表リスト

- 表 2.1-1 FBR実証炉向け広域系中性子検出器概略仕様
- 表 2.2-1 検出器照射試験時の確認項目と相乗効果
- 表 2.2-2 照射試験の優先度と実現方法
- 表 2.2-3 照射位置と積算照射量の予測量
- 表 2.2-4 検出器試験体での評価項目
- 表 2.2-5 材料の物性データ
- 表 2.2-6 計算条件
- 表 2.2-7 計算結果
- 表 3.3-1 照射装置の放射化量評価
- 表 3.3-2 中性子検出器の放射化量評価

1. はじめに

FBR実証炉では、広域系核計装を炉容器内の高温ナトリウム中で使用することが想定されており、高感度で高温・高放射線条件下においても安定した信頼性の高い作動特性を有する中性子検出器を開発する必要がある。これには、照射温度、放射線強度（中性子、ガンマ線）および積算照射量等の実機使用条件を模擬した照射試験を実施し、実作動による中性子検出器の健全性を確認する必要がある。

このため、照射中の中性子検出器の絶縁抵抗、電圧プラトー、パルス波高等の作動特性や照射前後の検出特性の変化を調べ、検出器としての照射特性を把握しておく必要があり、また、検出器感度の低下要因となる検出器内部に塗布したウランの減少や封入した電離ガスの変質による核的な照射寿命、検出器構成材の劣化や絶縁低下等についても照射試験で確認する必要がある。

本報告書は、この照射試験を「常陽」で実施する場合の予備検討として、照射試験の必要性、優先度をまとめ、照射位置と照射条件を検討評価し、照射試験装置の概念等を明らかにすることを目的としたものである。

2. 照射試験計画の検討

2.1 FBR実証炉向け広域系中性子検出器

(1) 中性子検出器開発の現状

FBR実証炉用の広域系中性子検出器は、原子炉起動から定格出力までの領域を測定できるよう開発が進められている。広域系中性子検出器は、原子炉起動時に必要な計数率を確保できるよう原子炉容器内の炉心槽側部に設置するが、これまで開発されてきた中性子検出器では、起動時に必要な計数率を確保できないため、さらに高感度化する必要がある。

また、原子炉容器内に設置することから、これまで開発してきた中性子検出器の使用温度が上昇するため、耐高温性を向上させる必要がある。

以上の要求条件をもとに、FBR実証炉用中性子検出器を開発するに際して、以下のような基本仕様を設定した。

① 検出器型式

10桁の計測範囲を持ち、かつ、出力領域でも使用できる検出器とするため、核分裂計数管とする。

② 測定範囲

第1サイクル起動時から広域中性子束高の設定値以上を計測できるように測定範囲を原子炉定格出力の約 $10^{-8}\%$ ～125%とする。

③ 感度

広域系中性子検出器に用いる核分裂計数管の開発限界感度であり、また第1サイクル原子炉起動時に必要な計数率を確保できる感度として熱中性子換算で0.5 cps/nv以上の感度を有する。

④ 温度条件

通常運転状態に余裕をみて連続使用590℃、事故時監視計装として事故時650℃(使命期間1日)とする。

⑤ 耐用年数

運転費抑制、廃棄物発生量の抑制の観点から4年を目標とする。

これらの基本仕様をもとに、2種類の検出器について、従来型の広域系中性子検出器の高感度化並びに耐高温性向上を図った設計を行い、部分試作による基本要素の確認、検出器試験体の製作による基本特性の確認、実機用検出器試作による高温

耐久試験並びに原子炉試験を順次実施してきており、基本的な部分の開発は終了している。これまでに開発された広域系中性子検出器の概略仕様を表 2.1-1 に示す。このうち、I タイプの検出器における高温耐久性試験並びに原子炉試験結果について、メーカー社内試験データを参考資料として示す。

(2) 中性子検出器設置位置と環境条件

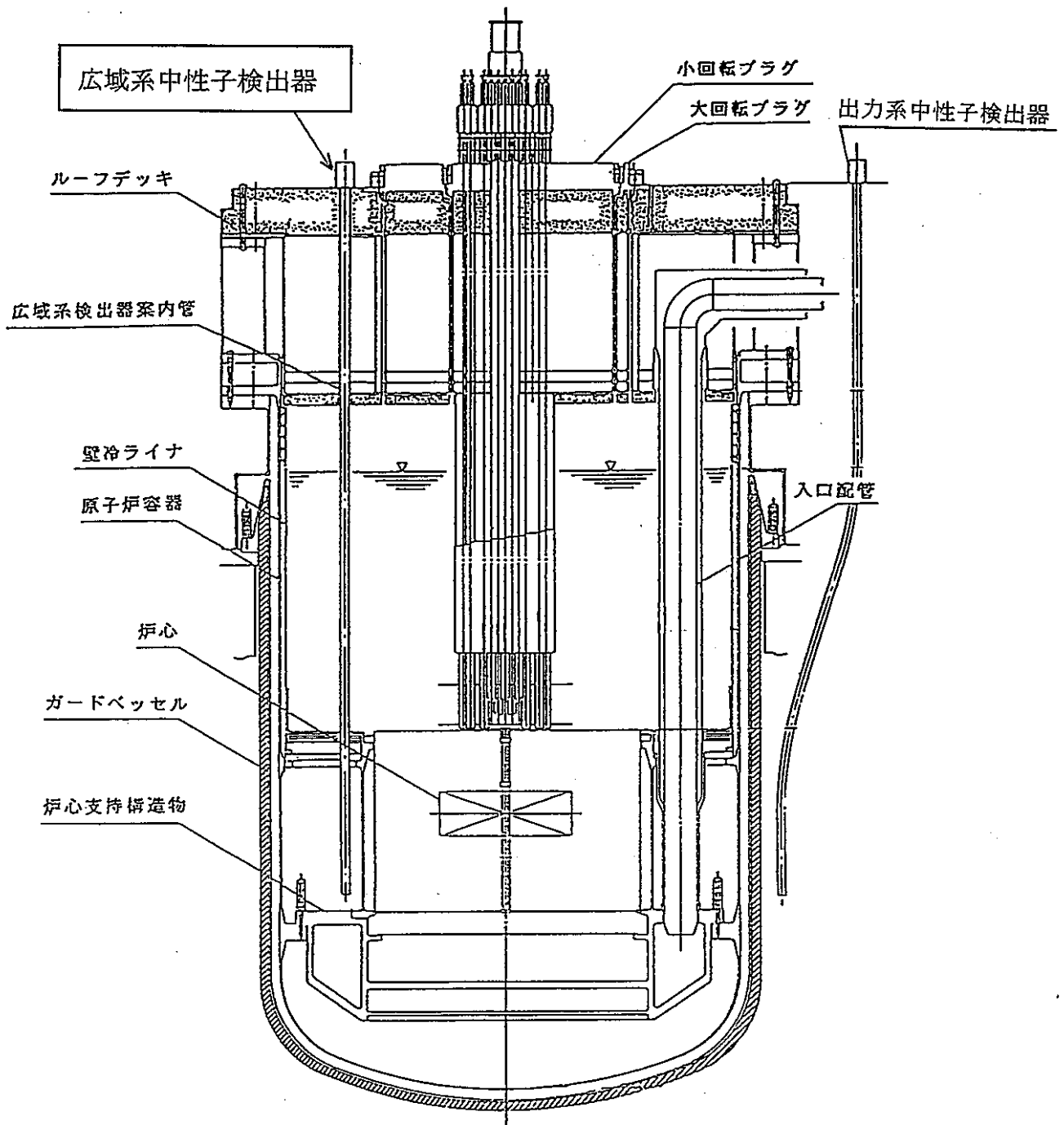
FBR 実証炉における広域系中性子検出器の設置位置は図 2.1-1 に示すように炉心槽側部に設置される予定である。この位置は原子炉定格出力時、全中性子束が $2.8 \times 10^{11} \text{nv}$ で、冷却材温度が約 450°C ある。従って、広域系中性子検出器の目標寿命 4 年に対し、4 年分の積算照射量として

$$2.8 \times 10^{11} \text{nv} \times 60 \text{s} \times 60 \text{min} \times 24 \text{hr} \times 365 \text{d} \times 4 \text{y} = 3.53 \times 10^{19} \text{ nvt}$$

の照射を受けることで検討する。

表2.1-1 FBR実証炉向け広域系中性子検出器の概略仕様

項 目	仕 様	
	Iタイプ	IIタイプ
検 出 器 型 式	核 分 裂 計 数 管 電 離 箱	
外 径 寸 法 外 径 全 長	ϕ 76 mm L 533 mm	ϕ 54 mm L 551 mm
熱 中 性 子 感 度	0.5 cps/nv (パルスモード)	
材 質 外 筒 絶 縁 材	インコネル600 アルミナ	インコネル600 アルミナ
充 填 ガ ス	Ar + N ₂ 混合ガス	Ar + N ₂ + He 混合ガス
設 計 温 度	連 続 使 用 590 °C 事 故 時 650 °C (使命期間 24時間)	
測 定 範 囲	約 10^{-8} ~ 125 %	
耐 用 年 数	4 年 (目 標)	
M I ケーブル 芯 線 導 体 絶 縁 材 ケ ー ブ ル 数	銅 アルミナ 1	銅+インコネル マグネシア 2



広域系中性子検出器設置場所の条件

全中性子束	2.8×10^{11}	n/cm ² · s
熱中性子束	約 2.5×10^9	n/cm ² · s
高速中性子束	約 5.0×10^9	n/cm ² · s
ガンマ線	5×10^5	R/hr
冷却材温度	450℃	

図 2.1-1 FBR実証炉の中性子検出器設置位置概念図

2.2 照射計画

2.2.1 検出器照射試験検討

(1) 照射試験の必要性

広域系中性子検出器（以下、検出器と省略）の照射並びに検出器を高温雰囲気を設置することで、検出器の初期特性に影響を与え、検出器の性能を低下させると考えられる内容を以下に示す。

① 放電開始電圧の変化

中性子照射により、構成部品の表面状態の変化、電極表面のウラン塗布面の変化、放射線による電子放出率の変化により、放電開始電圧が低下する可能性がある。さらにこの変化は高温による活性化のため、中性子照射のみの影響より変化が顕著に現れる可能性がある。

② 絶縁抵抗の低下

構成材料中の不純物が、放射線によりはじき出され、セラミックス表面に付着し、セラミックスの絶縁抵抗を低下させる可能性がある。また、高温状態ではセラミックスと金属の間に化学反応が起こり、その生成物の影響で絶縁低下が起こる。通常は、800℃以上でしかこの反応は起こらないと言われているが、放射線の影響により反応物質が活性化し、化学反応の速度が上昇する可能性がある。

③ 核変換による絶縁低下

検出器のケーブルに用いている銅は放射線により亜鉛に変化する。この亜鉛は蒸発しやすいため、高温化ではケーブル内部に拡散し、また、放射線により電離する。これらは、ケーブルに印加した電圧により収集され、ケーブルの絶縁抵抗を低下させる可能性がある。

④ パルス波形の変化

核分裂によりFPガスが生じるが、高温状態ではそれらの発生、吸着のため特性が変わることが考えられる。これにより、電離ガスのW値または電子移動度が変化し、パルス波形が変化する可能性がある。

以上の内容を表 2.2-1 にまとめた。

(2) これまでの検出器照射経験

国内では、これまでに「常陽」の起動系及び中間出力系用の核分裂計数管として開発

された検出器 (K S A) 並びに日本原子力研究所で高温用核分裂計数管として開発された検出器 (F X) があり、どちらも照射試験を行っている。

以下にこれらの検出器の照射実績を示す。

(i) K S A

K S A (中性子感度: 0.12 cps/nv、使用温度 400°C (max 550°C)) は、昭和 54 年 3 月に「常陽」予備チャンネル (CH-9) に設置し、昭和 54 年 7 月から「常陽」への適合性を確認する試験、昭和 56 年 12 月までの長期耐久性試験と約 3 年にわたる実用化試験を行い、 1.19×10^{17} nvt の積算照射量を受けている。

また、それに先駆け昭和 50 年度に動燃殿委託により、原研 4 号炉での寿命特性性能試験を行い、400°C の加熱サイクル、 7×10^{18} nvt の照射量を与えて性能変化がない結果を得ている。(文献 2.2-1)

(ii) F X

F X (中性子感度: 0.1/0.3 cps/nv、使用温度 600°C) は耐熱性をもつ核分裂計数管で、600°C で少なくとも 6.5×10^{18} nvt の積算照射量を受けている。(文献 2.2-2)

以上、これまでの検出器の照射実績をまとめたものを図 2.2-1 に示す。また、実証炉で 4 年間の使用に相当する照射試験の達成イメージを図 2.2-2 に示す。

(3) 照射試験の優先度と実現方法

表 2.2-2 にタイプ I の検出器に関し、検出器の照射試験の優先度並びに実現方法について検討した内容をまとめた。優先度のうち、A は実証炉用の検出器の健全性確認のために試験が不可欠の項目を表し、B はこれまでの試験経験から問題ないと考えられるが、実証炉を包絡できるデータがないため試験の必要な項目を示す。また、C はほぼ問題ないと考えられる項目であり、確認する程度でよいものを示している。

試験の実現方法として、部品単位の照射で検証できるもの、電極なしの元素照射*で検証できるもの、元素照射で検証できるもの、全体の組立品で検証できるものに分けて検討した。

*元素照射: 実証炉用検出器は、高感度達成のため、電極を含む元素を複数体アッセンブリしている。しかしながら、元素は同一仕様のため、元素 1 体の検出器の照射で実証炉用検出器の検証ができる。

(i) 放電開始電圧の変化

放電開始電圧を早める要因として、部品の表面状態の変化、ウラン塗布状態の変化、材料の電子放出率の変化が考えられる。これらの項目は、中性子、温度の影響を受け更に、検出器は通常 200 V で電圧を印加していることの影響があるものと考えられる。

(2) で示したように、これまで開発してきた検出器は、F B R 実証炉での使用条件を満足する中性子束、温度双方を包絡した試験経験がないため、実証炉条件で確認することが不可欠であり、優先度は A である。この場合、部品レベルの照射で検証できる部分もあるが、健全性の判定が困難であること、また、ウランの塗布面の確認は、電極にウランメッキを施す方法しかないため、エレメント照射あるいは全体の組立品での照射を行い、検出器の放電開始電圧変化を測定することで健全性を確認することが合理的である。

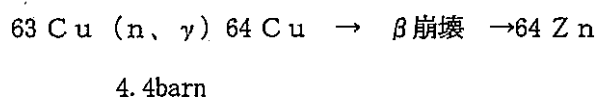
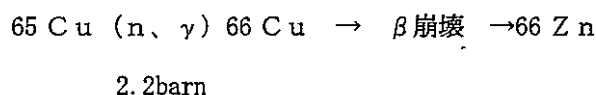
(ii) 絶縁抵抗の低下

絶縁低下を起こす要因として、セラミックスの変化による影響が考えられる。セラミックスと金属の間の化学反応については、検出器の外筒（検出器を保護する外側の容器）検出器内筒（電極を保護する内側の筒）ともに高ニッケル材であるインコネルを採用しており、これまでのインコネルを用いた検出器の照射経験から推定して問題にならないと予想される。また、セラミックスの絶縁低下については、不純物の少ない高純度アルミナの使用をしており問題にならないと予想される。但し、実証炉条件での照射した試験経験がないため確認は必要であり、優先度を B とする。アルミナの影響を調べる試験は、部品レベル以上の試験で可能である。

(iii) 核変換による絶縁低下

MI ケーブルの芯線は、パルス伝送特性を考慮して銅を使用している。銅は放射線により亜鉛に変化するため、この影響を確認する必要がある。

銅が亜鉛になる核変換は



であり、積算照射量 3.53×10^{19} nvt に対して

$$6.6 \times 10^{-24} \times 3.53 \times 10^{19} = 0.023\%$$

変換される。この発生割合は低いと思われるが、文献 2.2-2 によれば、未照射で銅芯線の MI ケーブルの高温試験結果では、600°C で放電開始電圧が 250 V ~ 300 V 程度まで低下する。この原因は、絶縁体表面に銅、亜酸化銅が蒸着するためと報告されている。

今、蒸気圧は、

Cu : 1879°C (10mmHg)

CuO : 1155°C (7.6mmHg)

Zn : 593°C (10mmHg)

であるため、600°C で CuO の蒸発が問題になったとの報告から推定して、照射により Cu が Zn に核変換した場合、蒸気圧が CuO より低い Zn の影響が発生することが考えられる。

以上から実証炉条件での確認が不可欠であり優先度は A である。MI ケーブルの確認は部品レベル以上の試験で可能である。

(iv) パルス波形変化

パルス波形が変化する要因としては、検出器のシール構造破壊による圧力変動、FP ガスによるガス成分変化、窒素吸収が考えられる。

このうち、検出器のシール構造については、使用するセラミックス成分にもよるが、文献 2.2-3 によれば、 3.5×10^{19} nvt 程度の照射では 0.1% の膨張であるため、問題ないと予想される。FP ガスの影響については、これまで他の核分裂計数管でも報告がないことから問題ないと予想される。また、窒化の問題も高ニッケル材の使用により、問題ないと予想される。従って、優先度は B とする。パルス波形の試験は、検出器の体系である必要があるため、エレメント照射あるいは全体を組上げたもので照射する必要がある。シール構造部分については、照射により破損、変形がないという構造の健全性を確認することで検証できるため、部品レベルの試験で可能である。

表 2.2-2 では、上記の内容の他、照射試験により同時に検出器の性能確認もできるため、感度変化確認、計測性確認等についても記載した。

2.2.2 常陽での照射試験検討

「常陽」で検出器を照射する場合、照射に使用できる場所として炉心第3列〔3B3〕あるいは炉心第5列〔5A2〕での照射が可能である。その他の候補として、燃料交換孔、炉内検査孔、ITVでの照射も考えられるが、中性子束が低いこと、燃料交換時に検出器の取扱いに問題があること、耐震上の問題があることから検討対象から除外した。

また、炉心内では中性子束が高すぎるため、非常に短期間で必要な積算照射量が得られることになり、むしろ破壊試験になる可能性があるため、検討対象から除外した。

(1) 照射用中性子検出器

照射用検出器として、実機相当のもので検証できることが理想的であるが、照射位置に制限があることから寸法的には小さい方が望ましい。

FBR実証炉用中性子検出器（Iタイプ）は、高感度化するため、同一仕様の検出器エレメント3体を束ねて全体を保護するという構造をとっている。照射試験を行う上で、照射の影響はどのエレメントにも共通に発生するため、複数体である必要はなく、エレメント1体で試験できる。エレメントによる照射試験での充足性については2.2.1で述べたとおりである。従って、検出器の径については縮小できることになる。軸方向については、検出器を短尺化するためには、電極部分を短尺化することになる。しかしながら、電極部分を短尺化するためには以下の問題が発生する。

① ウラン塗布条件の見直し

電界メッキ法によりウラン塗布を行っているが、電極面積が変わることにより、ウラン濃度、流速、電界強度等の最適なメッキ条件の再検討が必要である。

② ウラン塗布面の健全性検証

新たに製作する必要があるメッキ治具及びウラン塗布状態の健全性を確認するために、エレメントの感度試験を行い、メッキ中の不純物による影響による出力特性劣化のないことを確認する。

③ エレメント健全性検証

メッキ面の健全性ととも、短尺エレメント構造の検証のため、エレメントの高温耐久性試験を実施する必要がある。

以上のように、検出器を短尺化するためには、電極の再評価が必要になり、これまでの開発手順を繰返すことになるため合理的ではない。従って、検出器の短尺化は実施しないものとする。これらの結果から、照射試験用検出器としてエレメント1体型

のタイプとし、検出器寸法は $\phi 38 \times L 515$ となる。照射試験用中性子検出器を図 2.2-3 に示す。以後、照射試験については、本寸法で検討する。

(2) 常陽の中性子束

動燃殿より入手した各エネルギー群データ（文献 2.2-4）をもとに、第 3 列の軸方向に対して実施した全中性子束の計算結果を図 2.2-4 に示す。（検討では用いなかったが、1 群～9 群を高速中性子、10 群～20 群を中速中性子、21 群を熱中性子として計算した結果を参考として図 2.2-5 に示す。）

図 2.2-4 の横軸は炉心中心からの軸方向位置を cm 単位で示し、縦軸は全中性子束を示す。ここで、常陽炉心中心位置は GL-10860、ハンドリングヘッド頂部が GL-9490 であることから、ハンドリングヘッド頂部は $10860 - 9490 = 1370\text{mm} = 137\text{cm}$ となる。

なお、第 5 列についても全中性子束を計算したが、図 2.2-6 に示すように、第 3 列の方が中性子束が大きいため、照射量を多くとれる観点から第 3 列で検討した。

(i) 照射用検出器との位置関係

実証炉の定格時の中性子検出器設置位置での全中性子束は、 $2.8 \times 10^{11}\text{nvt}$ であり、目標寿命は 4 年であるため、必要な照射量は $3.53 \times 10^{19}\text{ nvt}$ となる。

今、「常陽」MK-III は、1 サイクル 60 日運転の 5 サイクルで定検になることから、照射計画は 300 日単位で検討することが合理的である。

(a) 定検間隔で照射する場合

照射時間を 300 日として計算すると、

$$3.53 \times 10^{19}\text{ nvt} \div (300\text{d} \times 24\text{hr} \times 60\text{min} \times 60\text{sec}) = 1.36 \times 10^{12}\text{ nv}$$

より中性子束が大きな場に検出器を設置する必要がある。この位置は、図 2.2-4 より、炉心中心から 179.9cm のところとなる。一方、検出器の下端位置は、冷却材流路の確保、燃料集合体出口温度計の設置中性子束を正確に知るためのドシメータの設置により、ハンドリングヘッド頂部より 13.0cm の位置となり（図 3.2-2 参照）、炉心中心から $137 + 13.0 = 150.0\text{cm}$ の位置となる。

(b) 定検をはさんだ間隔で照射する場合

照射時間を 600 日として計算すると、

$$3.53 \times 10^{19}\text{ nvt} \div (2 \times 300\text{d} \times 24\text{hr} \times 60\text{min} \times 60\text{sec}) = 6.81 \times 10^{11}\text{ nv}$$

より中性子束が大きな場に検出器を設置する必要がある。図 2.2-4 より、第 3 列で

上記中性子束が得られる位置は、炉心中心から 192cm 付近である。

以上に述べた「常陽」の全中性子束と検出器の構造の関係を表 2.2-3 に示す。表 2.2-3 に示すように、300 日照射では、電極部分の一部までしか必要照射量が得られないことが分かる。また、600 日照射では、ケーブル部及びケーブルシール部の照射量がわずかに不足することが分かる。

(ii) 照射期間の短縮化検討

600 日の照射でもエレメント試験体全体を照射確認することが困難なため、ここでは、エレメント照射に加えて、部品での照射を加味することで照射期間を短縮できるかどうか検討した。2.2.1(3)で検討したように、照射試験にて優先的に確認すべき項目は、放電開始電圧の変化、核変換物質の影響である。これらの項目のうち、検出器内で原因となり得る箇所は電極部、電極シール部、ケーブル部、ケーブルシール部に分類できる。300 日照射では、電極部が必要照射量を満足するが、電極の一部に照射量が不足する箇所ができる。しかしながら、以下の理由で全体評価できる。

① 部品の表面状態の変化

検出器の材料の一部分は実証炉の照射条件を満足している。また、検出器への影響が照射により大きく変化することは考えにくいため、照射初期段階で検出器の基本性能を十分確認しておくことで評価できる。

② ウラン塗布面の状態の変化

300 日照射では電極の一部が照射条件を満足しないが、電極表面はほぼ一緒になっていることから、電極の一部が実証炉の照射条件を満足していれば、健全性の評価ができる。なお、600 日照射なら必要な照射条件を満足する。

③ 材料の放出率の変化

検出器の材料の一部分は照射条件を満足している。また、検出器への影響が照射により大きく変化することは考えにくいため、照射初期段階で検出器の基本性能を十分確認しておくことで評価できる。

④ 核変換物質の影響

300 日照射、600 日照射どちらもケーブル部は、照射条件を満足しないが、表 2.2-2 に示すように、ケーブルは部品での照射による健全性が確認できるため、ケーブル単品の照射試験を計画することで対応できる。

⑤ シール端子の構造健全性

電極シール部とケーブルシール部は同一構造のため、一方を検証できれば良いことになる。600 日照射なら電極シール部が照射条件を満足するが、300 日照射では、シール部の照射条件を満足しない。表 2.2-2 に示すよう、シール端子の部品レベルでの照射による健全性が確認できるため、300 日照射の場合はシール端子の単品の照射試験を計画することで対応できる。

⑥ セラミックスの汚れ等の絶縁抵抗低下

セラミックスの不具合による絶縁低下は照射開始、加熱開始初期に発生する可能性が高い。また、絶縁低下も徐々に低下する等の傾向を示すため、照射条件が不足しても内外挿が可能である。

⑦ 封入ガスの変化

電極部は 300 日照射でも部分的には照射条件を満足しているため、封入ガスに異常があればパルス波形に影響がでることから、定期的な波形観測で評価できる。

以上をまとめると、照射試験を 600 日で計画する場合は、エレメント照射にケーブル単品の照射を行うことで実証炉の照射条件を満足できる。照射試験を 300 日で計画する場合は、エレメント照射に加えて、ケーブル単品の照射並びに電極シール部の部品照射で照射条件を満足できる。以上の内容をまとめて表 2.2-4 に示す。

(iii) 2 体同時照射の場合の検討

実証炉用に開発している検出器が 2 種類あることから、2 体同時に照射試験を実施できると効率的である。「常陽」第 3 列に 2 体の検出器を装荷して照射する場合、照射装置からの制約条件により、検出器下端が炉心上部から 275mm の位置となる。この場合、300 日照射で実証炉照射条件を満足できる位置は電極部分の途中である。また、600 日照射でも同様に実証炉照射条件を満足できる位置は電極部分の途中までである。従って、(ii) の結論と同様に 2 体同時照射の場合でもタイプ I の検出器では、エレメント照射に加えて、ケーブル単品の照射並びに電極シール部の照射を行うことで 300 日で照射条件を満足できる。また、タイプ II の検出器もタイプ I 同様に検出器単体並びに部品での照射が必要と考えられるが、詳細は別途検討する必要がある。

(3) 要素試験について

検出器の照射試験時に、ケーブル及びケーブルシール端子の照射試験が必要になるため、部品の要素試験について検討した。

(a) 試験体概念

試験体は、MIケーブル本体と、MIケーブルの気密シール端子である。気密シール端子部には、気密シール端子を構成するセラミックスを密封するためのシールカバーを設けている。シールカバーの形状は、エレメント照射に用いている検出器の形状でそのまま照射した場合は、 $\phi 38 \times L100\text{mm}$ 程度である。ただし、3重シールドケーブルのシールド間の検証を、同じように銅を用いている芯線-シールド間の絶縁抵抗を検証することで省略した場合は、シールド間を短絡した気密シール端子を用い、シールカバーの形状は、 $\phi 20 \times L100\text{mm}$ 程度となる。要素の試験概念を図 2.2-7 に示す。

(b) 確認項目

照射試験体の性能を確認する項目として、

- ① 絶縁抵抗
- ② 放電開始電圧
- ③ パルス伝送特性

とする。項目①は、照射前後並びに照射中に、照射試験に用いている検出器の使用電圧を印加し、リーク電流を測定し、絶縁抵抗を測定する。項目②は、照射前、照射末期および照射後の3回程度、高圧を約800Vまで印加し放電開始電圧を測定する。項目③は、照射前後および照射中に中性子パルスと同じパルス幅を有するパルスケーブルに加え、ケーブル先端で反射する反射波を測定する。

以上のことを確認することで、検出器の照射試験で実証炉条件を満足できない部分については要素としての部品照射で検証できる。

(5) ガンマ線発熱量

実証炉の広域系中性子検出器は、590°C仕様の検出器である。「常陽」炉心第3列で照射する場合、冷却材の温度に加え、検出器自体の発熱による温度上昇分を考慮する必要がある。ここでは検出器の発熱量について概略検討を行った。

電極部分の中央は熱伝導度の低いガスによって径方向が絶縁されているため、ガンマ線発熱により最も高温となると考えられる。評価方法としては、この部分の発熱量を径方向の1次元温度解析によって評価する。

(a) 計算体系

右図に計算体系を示す。電極中央部での照射装置本体の外径はφ86である。照射装置本体の径は、この電極中心より上部で大きくなっているが、その効果については、径を変えた場合の計算を行い影響を評価する。

(b) 材料データ

表 2.2-5 に使用した材料データ及び表 2.2-6 に計算条件をまとめて示す。

各材料でのガンマ線の発熱量Qは、

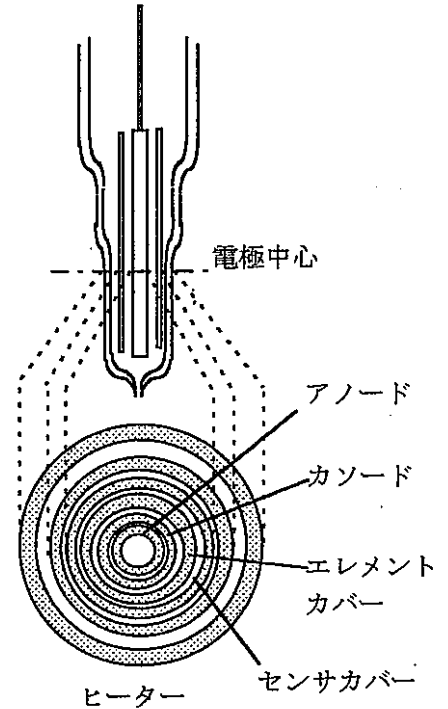
$$Q=16.3 \times 10^{-14} \times \phi \times E \times \mu$$

Q : 発熱量(W/cm³)

φ : ガンマ線束(光子/cm²-s)

μ : エネルギーEに対する吸収係数(/cm)

E : ガンマ線エネルギー



より計算する。なお、ガンマ線エネルギーは1.5MeVとし、そのときの吸収係数は0.02(/cm)を用いた。

ヒータ部の熱伝導度は、1/20 がステンレスで構成され、残りはアルゴンであると仮定し、下式より計算した値を用いた。なお、密度も同様に存在比で補正した。

$$\text{熱伝導度}=(\text{ステンレスの熱伝導度})/20+(\text{アルゴンの熱伝導度}) \times 19/20$$

次に、照射装置本体とヒータ部間の熱伝導度は、表面積の軸方向の1/90 が接触していると仮定し、下式より計算した。

$$\text{熱伝導度}=(\text{ステンレスの熱伝導度})/90+(\text{アルゴンの熱伝導度}) \times 89/90$$

(c) 計算結果

表 2.2-7 に計算結果を示す。検出器先端でのガンマ線束で計算した場合でも530°C程度である。一方、最も照射量の低い位置では、検出器のガンマ線による発熱はほとんどないことがわかる。照射装置の外径の半径を変えた場合の影響は10°C程度である。

なお、本計算では、放射伝熱、径方向の熱伝熱を無視しており、また、使用材料の熱伝導度も使用した300°Cより高温では大きくなるため、実際の加熱温度は評価値よりさらに低いと考える。

従って、ガンマ発熱分のみでは試験温度が不足するため、ヒータによる昇温が必要である。

(6) 照射後試験

中性子検出器として考えられる照射後試験について、基本的には、照射試験中に何らかの不具合が発生した場合に実施する内容として以下に示す。

照射試験中に放電開始電圧の変化およびパルス波形の変化が生じた場合は、これらは封入ガスの状態に影響されやすい項目であるため、照射後の解体により原因を究明することはできないと考えられる。

絶縁抵抗の低下に関しては、解体時に衝撃により絶縁抵抗が回復するなどの可能性もあるが、精密な解体により低下場所に特定ができる可能性がある。この場合は、ウラン塗布面、金属-セラミックス接触部等の観察のために500倍程度の倍率で観察する。

なお、これらの試料づくり等は、検出器が高線量であることが予想されるため、マニピュレータにより解体し、小型試料にした後、写真撮影、SEM(走査型電子顕微鏡)で観察する必要がある。表2.2-2に照射後試験により確認可能な項目について示した。

表 2.2-1 検出器照射試験時の確認項目と相乗効果

確認項目	放射線と温度の相乗効果の可能性
放電開始電圧の変化	<p>中性子照射により、構成部品の表面状態の変化、電極表面のウラン塗布面の変化、および放射線による電子放出率に変化が起こり、放電開始電圧が変化する可能性がある。これらの変化は、温度にも影響される可能性がある。</p>
絶縁抵抗の低下	<p>高温状態では、セラミックスと金属の間に化学反応が起こり、その生成物により絶縁低下がおこる。通常、800℃以上でしかこの反応は問題とならないが、放射線の照射により、この反応物質が活性化し、化学反応の速度が上昇する可能性がある。</p> <p>また、その他の構成材料中の不純物も、放射線によりはじきだされ、セラミックス表面に付着し、セラミックの絶縁抵抗を低下させる可能性がある。</p>
核変換による絶縁低下	<p>センサのケーブル部に用いている銅は放射線により亜鉛に変化する。この亜鉛は蒸発しやすいため、高温ではケーブル内部に拡散し、また、放射線によって電離する。これらは、ケーブルに印加した電圧により収集され、ケーブルの絶縁抵抗を低下させる可能性がある。</p>
パルス波形の変化	<p>核分裂により FP ガスが生じるが、高温状態ではそれらの発生、吸着により特性が変わることが考えられる。これにより、電離ガスの平均のW値または電子移動度が変化し、パルス波形が変化する可能性がある。</p>

表 2.2-2 照射試験の優先度と実現方法

確認すべき内容	優先度	評価手段の検討						
		変化の主な要因	要因へ影響するパラメータ	部品照射 ^{*1}	電極なし エレクト照射 ^{*2}	エレクト照射 ^{*3}	センサ全体照射 ^{*4}	照射後試験 ^{*5}
放電開始電圧の変化	A	部品の表面状態の変化	温度/放射線/電圧	×	△	○	○	
	A	ウラン塗布面状態の変化	温度/放射線/電圧	×	×	○	○	○
	A	材料の電子放出率の変化	温度/放射線/電圧	△	○	○	○	
絶縁抵抗の低下	B	化学反応生成物の生成	温度/放射線/電圧	△	○	○	○	○
	B	セラミックスの表面汚れ	温度/放射線/電圧	×	△	○	○	○
	B	セラミックスの物性変化	温度/放射線	○	○	○	○	○
	C	構成材料の放射化の影響	放射線	×	○	○	○	
核変換の絶縁低下	A	核変換物質の影響(Cu→Zn)	放射線/電圧	○	○	○	○	
パルス波形変化 (立上時確認)	B	F P ガスによるガス成分変化	温度/放射線	×	×	○	○	
	B	封入ガス中の窒素吸収	温度/放射線	×	×	○	○	
	B	シールド端子破壊による圧力変化	温度/放射線	○	×	○	○	○
感度変化確認	A	塗布ウランの剥離	温度/放射線	×	×	△	○	
	C	エネルギー分布の影響・感度確認	放射線	×	×	△	○	
	A	照射量による変化	放射線	×	×	△	○	
計測性能確認	A	ノイズレベルの確認	温度/放射線	×	×	△	○	
	A	パルスキャンベルのオーバーラップ確認	温度/放射線	×	×	△	○	
	A	出力直線性の確認	温度/放射線	×	×	△	○	
全体構造の検証	C	熱膨張による変形	温度	×	×	△	○*6	

- (注記)
- * 1 : センサの構成部品個々の照射試験で健全性が確認できる項目
 - * 2 : ウランを塗布しないセンサ+MIケーブルの照射試験で健全性が確認できる項目
 - * 3 : 検出エレメント1本を含むセンサ部分試作により健全性が確認できる項目
 - * 4 : 実証炉向けセンサ照射で健全性が確認できる項目
 - * 5 : 照射後の解体試験において、変化原因の究明が可能である項目
 - * 6 : 構造材の健全性は、熱サイクル試験で検証可能

表 2.2-3 照射位置と積算照射量の予測量

センサ内部位	センサ先端からの距離 (mm)	炉心からの距離 (cm)	全中性子束 (nv)	300 日照射時 積算中性子束(nvt)	600 日照射時 積算中性子束(nvt)	×0.85 (nvt)
電極部	< 370	< 187.0	> 7.7×10^{11}	> 2.0×10^{19}	> 4.0×10^{19}	> 3.4×10^{19}
電極シール部	< 400	< 190.0	> 7.2×10^{11}	> 1.9×10^{19}	> 3.7×10^{19}	> 3.2×10^{19}
ケーブルシール部	< 445	< 194.5	> 6.5×10^{11}	> 1.7×10^{19}	> 3.4×10^{19}	> 2.9×10^{19}
ケーブル	> 445	> 194.5	< 6.5×10^{11}	< 1.7×10^{19}	> 3.4×10^{19}	< 2.9×10^{19}

必要全中性子束 300日照射 $> 1.4 \times 10^{12}$
 600日照射 $> 6.8 \times 10^{11}$

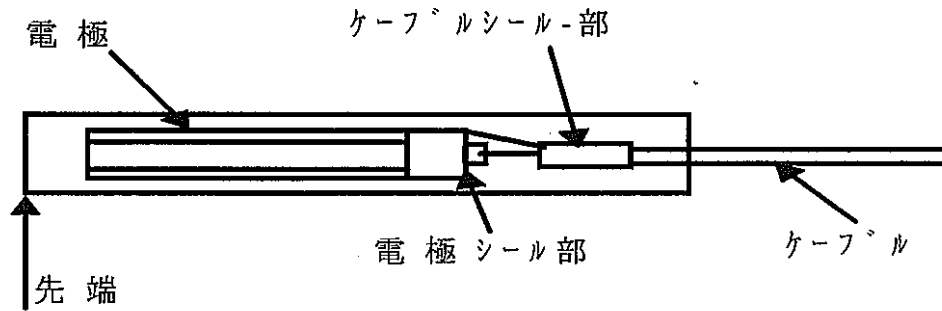


表 2.2-4 検出器試験体での評価項目

確認すべき内容	優先度	評 価 項 目		
		変化の主な要因	主な原因の発生位置	300日照射試験で検証可能な項目(注4)
放電開始電圧の変化	A	部品の表面状態の変化	電極部、電極シールド部、ケーブル部	×：ケーブル部で照射量が不足(注1)
	A	ウラン塗布面状態の変化	電極部	○：一部電極で照射量が不足
	A	材料の電子放出率の変化	電極部、電極シールド部、ケーブル部	×：ケーブル部で照射量が不足(注1)
絶縁抵抗の低下	B	化学反応生成物の生成	電極シールド部、ケーブルシールド部	×：電極シールド部が健全であれば、ケーブルシールド部も健全である。(注2)照射量が不足(注3)
	B	セラミックスの表面汚れ	電極部、電極シールド部、ケーブルシールド部	×：同上
	B	セラミックスの物性変化	電極シールド部、ケーブルシールド部、電極部	×：同上
	C	構成材料の放射化の影響	電極部、ケーブル部	×：ケーブル部で照射量が不足(注1)
核変換の絶縁低下	A	核変換物質の影響(Cu→Zn)	ケーブル部	×：ケーブル部で照射量が不足(注1)
パルス波形変化 (起動/停止時確認)	B	FPガスによるガス成分変化	電極部	○：
	B	封入ガス中の窒素吸収	電極部	○：
	B	シールド端子破壊による圧力変化	電極シールド部	○：
感度変化確認	A	塗布ウランの剥離	電極部	○：
	C	エネルギー分布の影響・感度確認	電極部	○：
	A	照射量による変化	電極部	○：
計測性能確認 (起動/停止時確認)	A	ノイズレベルの確認	全体	○：
	A	パルスキャンパルのオーバーラップ確認	全体	○：
	A	出力直線性の確認	全体	○：

(注1) 要素試験にて、ケーブル部の健全性を検証する。

(注2) ケーブルの芯線-シールド間の気密シールド構造は、電極気密シールドとほぼ同じ形状、環境条件にあるため、電極気密シールドの健全性が検証できれば、同様にケーブル気密シールドも健全であると推定可能

(注3) 要素試験にて、シールド構造部の健全性を検証する。

(注4) 300日照射試験で検証可能な項目で、○印は実証炉での必要中性子束が得られるものを×印は中性子が不足するものを示す。

表 2.2-5 材料の物性データ

材 料	密度(g/cm ³)	熱伝導率(W/m-K)
アルゴン	0.012	0.029(1atm,300°C) Ref1
ステンレス	8.03	19.0(300°C) Ref2
インコネル	8.51	19.0(300°C) Ref2
ヒータ部	0.43	0.43(計算より)
照射装置とヒータ間アルゴン	0.012	0.012(計算より)

Ref1:国立天文台編、「平成2年度理科年表」、丸善株式会社

Ref2:American Institute of Physics Handbook-3rd Edition

表 2.2-6 計算条件

項 目	使用 値	備 考
照射装置本体と周辺ナトリウムの 熱伝達率(kcal/m ² h°C)	6000	
周辺ナトリウムの温度(°C)	450	
ガンマ線束(光子/cm ² ·s)	7.2×10 ¹¹ ~ 9.0×10 ⁹	センサ先端から末端ま でのガンマ線束計算値

表 2.2-7 計算結果

計算条件		温度(°C)		
ガンマ線束(/cm ² ·s)	照射装置外径(mm)	ヒータ部	センサ表面	アノード部
4.9×10 ¹¹	φ 86	458	487	512
4.9×10 ¹¹	φ 141	470	500	523
7.2×10 ¹¹	φ 86	462	505	541
9 × 10 ⁹	φ 86	450	450	451

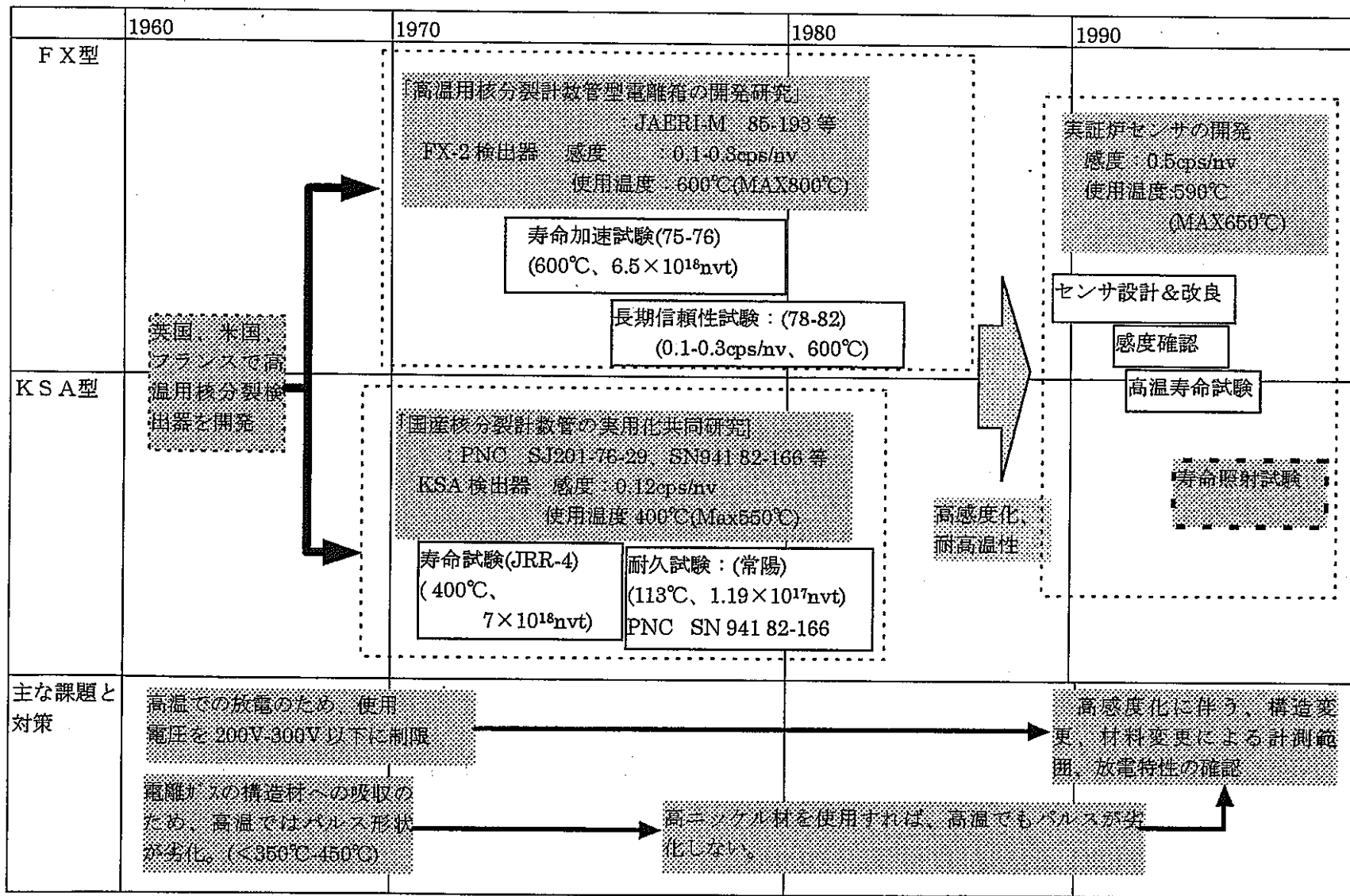


図 2.2-1 広域系中性子検出器の開発経緯

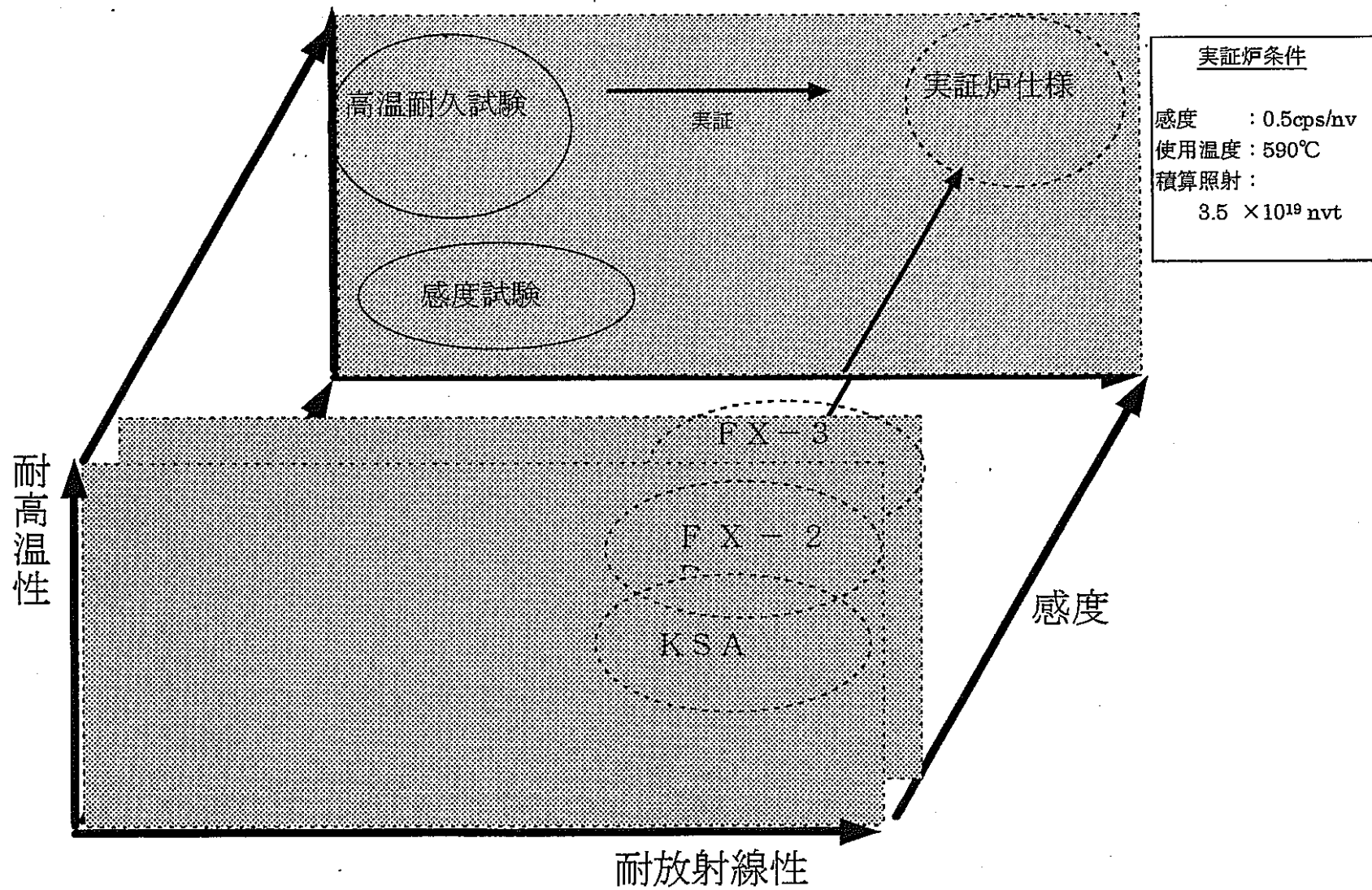


図 2.2-2 広域系中性子検出器の実証炉への達成度概念図

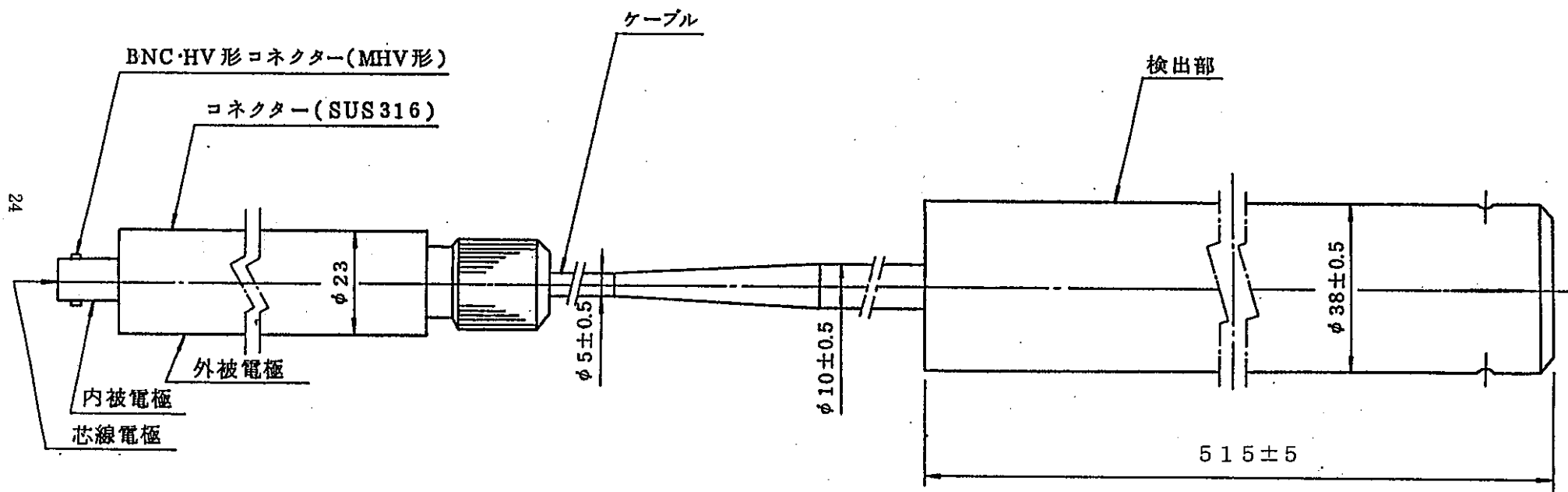


図 2.2-3 照射試験用中性子検出器外形図

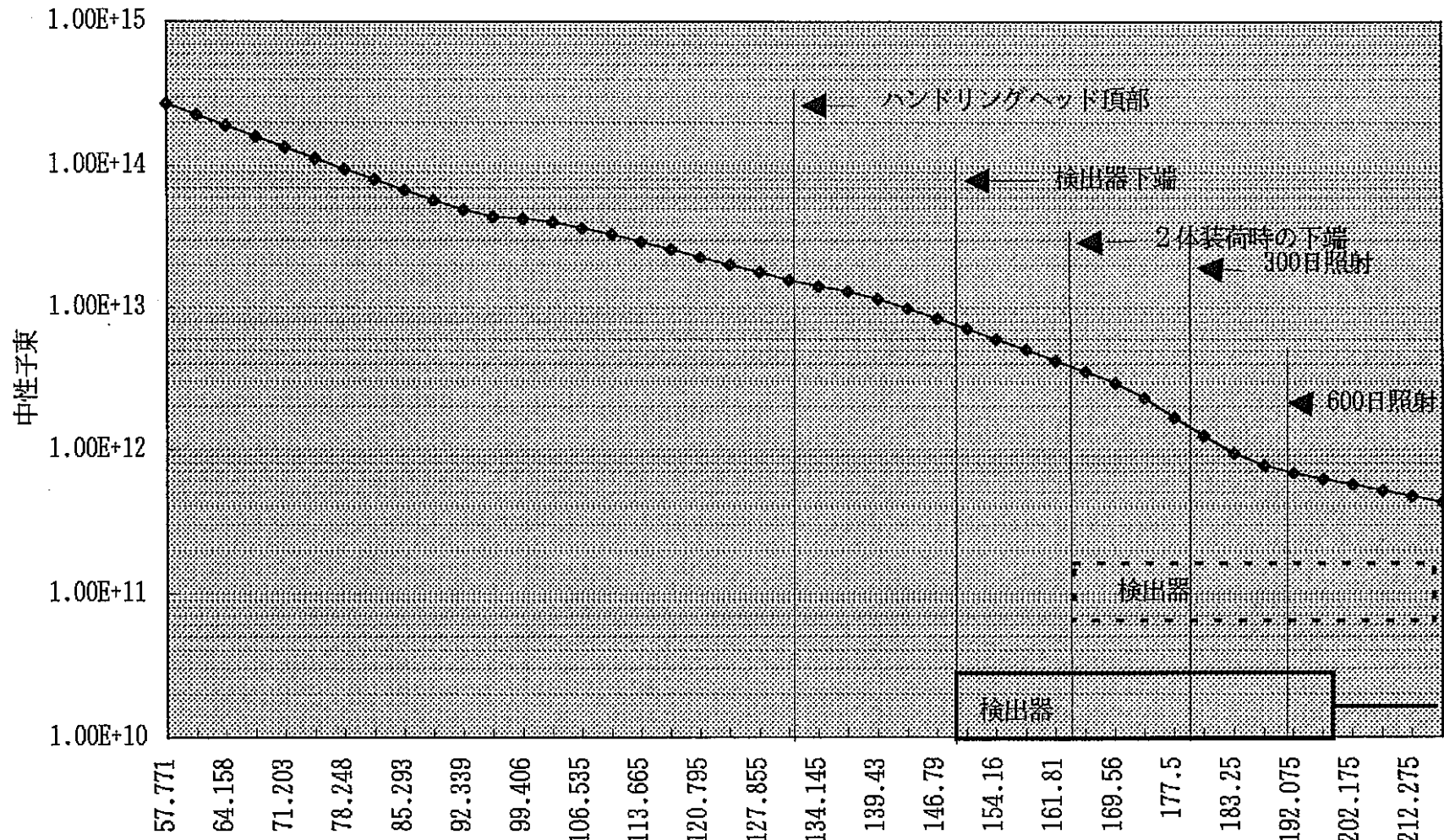


図2.2-4 第3列の全中性子束

中心からの位置 (cm)

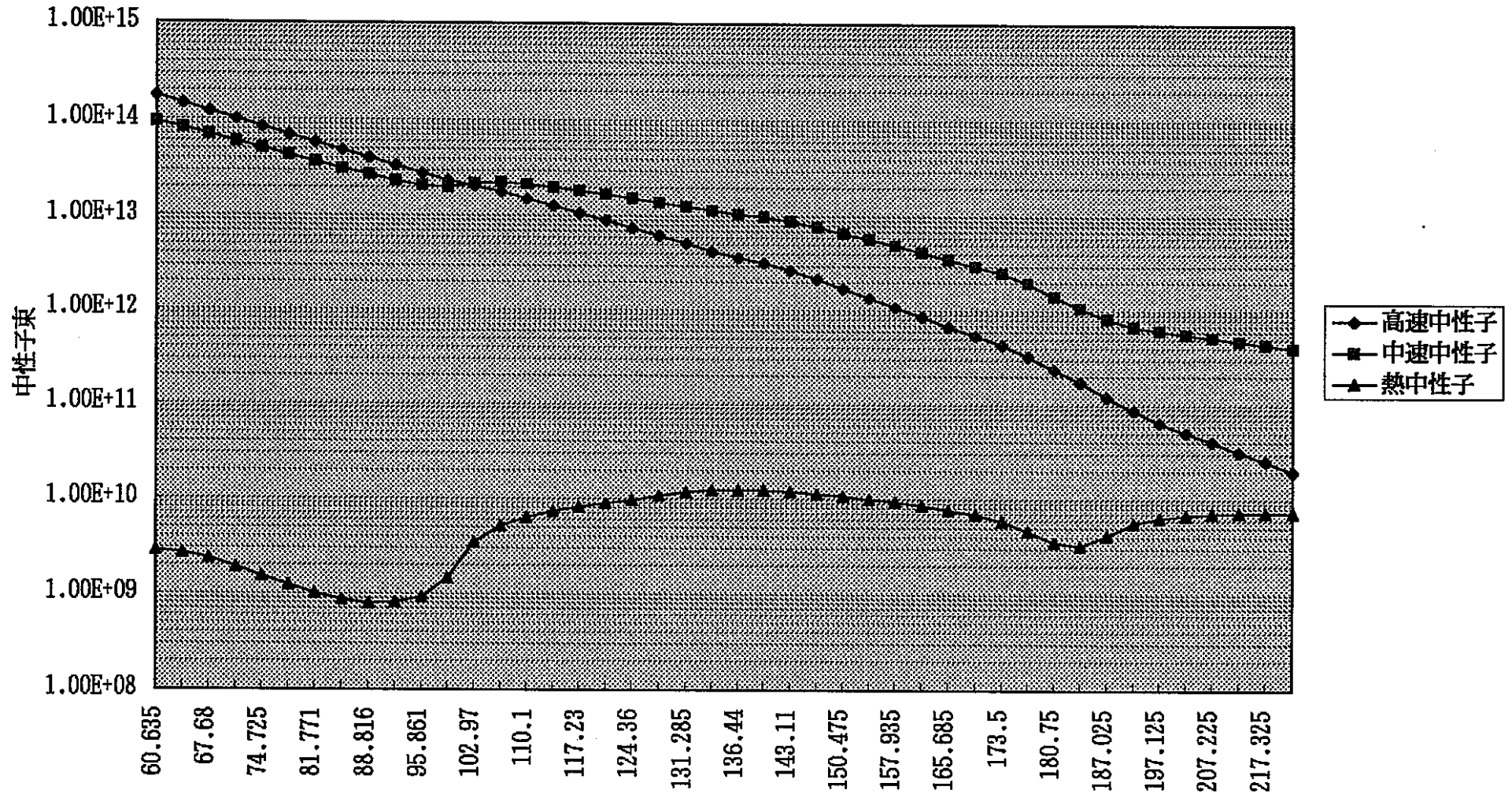


图2.2-5 第3列の中性子束

炉心中心からの位置 (cm)

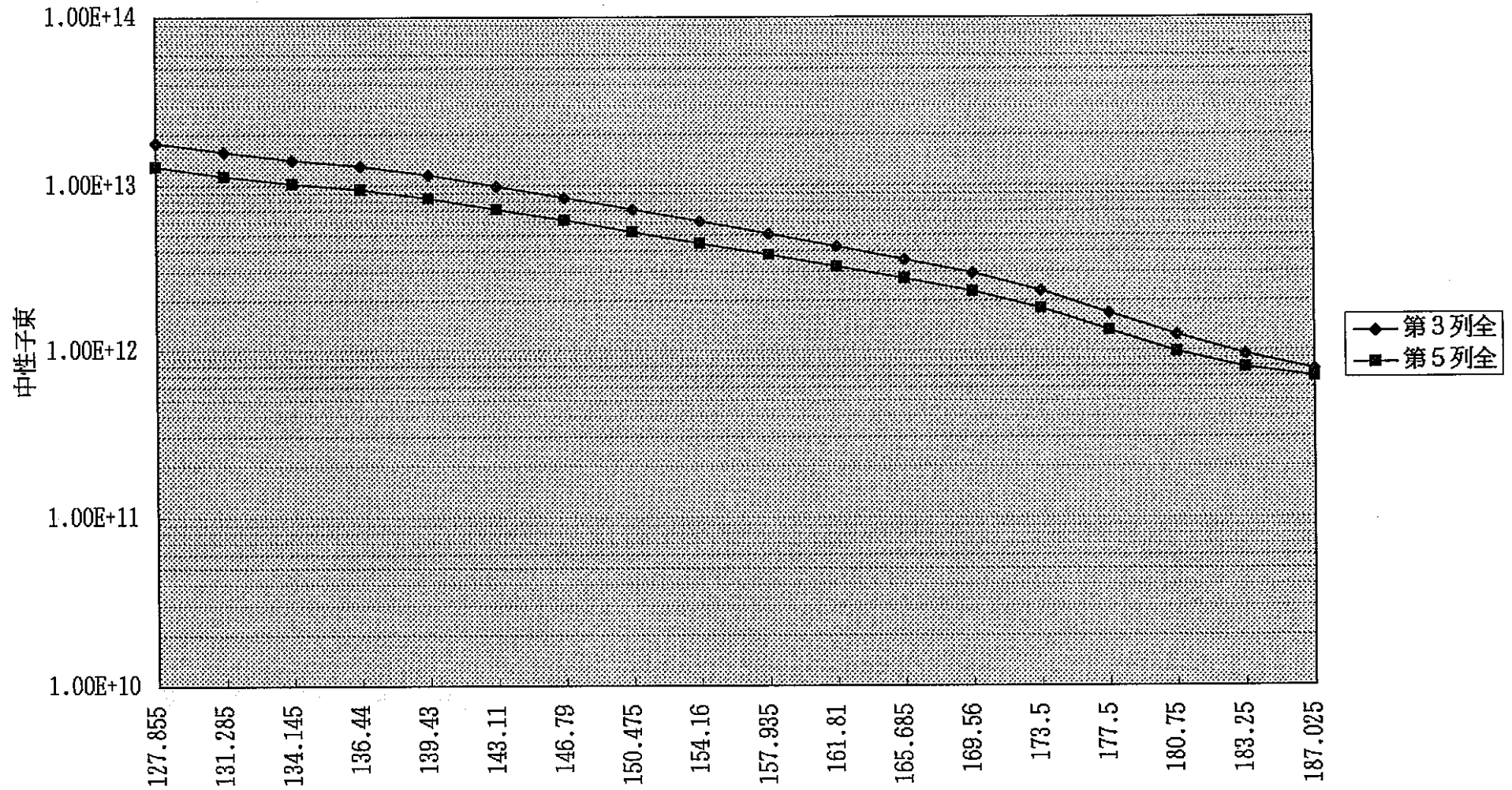


図2.2-6 第3列と第5の中性子束

炉心中心からの位置 (cm)

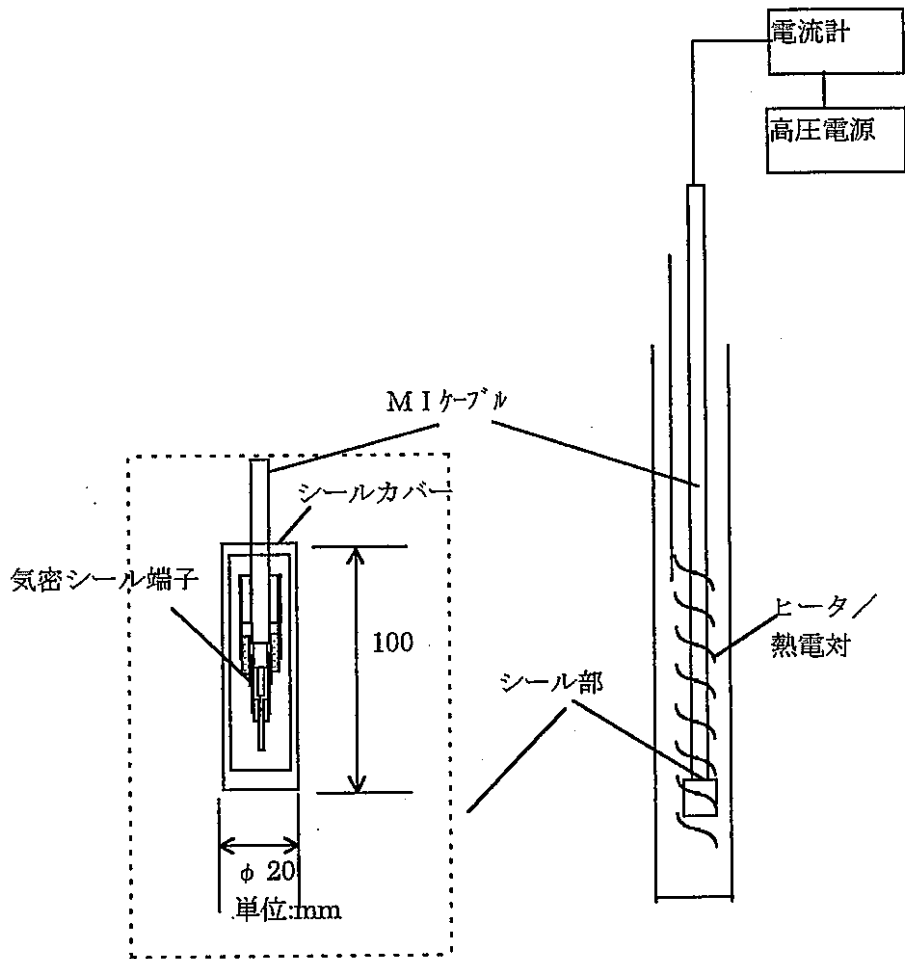


図 2.2-7 要素試験概念図

2.2.3 照射試験時の取得データの検討

(1) 試験採取データ

検出器照射試験中に検出器の健全性を定期的に確認する必要がある。

検出器の健全性確認方法として以下が考えられる。

① 絶縁抵抗試験

絶縁抵抗試験では、検出器の絶縁の健全性確認のため、照射試験期間において定期的にデータ採取を行い、その推移を確認する。

② 静電容量試験

静電容量試験では、検出器の健全性確認のため、照射試験期間において定期的にデータ採取を行い、その推移を確認する。

③ 感度低下確認

照射による検出器の感度低下割合を確認するため、レファレンスになる検出器との比較により、照射期間と感度低下の関係を確認する。なお、レファレンスになる中性子検出器、ガンマ線検出器については、照射試験の監視の高度化として今後検討していく必要がある。

④ パルス波形測定

封入ガス成分の変化や窒素吸収等が生じた場合は、検出器のパルス波形に影響されるため、原子炉の起動時、停止時にパルス波形を観測することで健全性の確認を行う。

⑤ プラトー特性

放電開始電圧の変化を確認するため、定期的にプラトー特性データを採取し、放電開始電圧の変化を確認する。

⑥ 計測性確認試験

照射期間、上記の健全性確認に加えて、計測性の確認試験を同時に実施できるため、検出器の出力直線性確認、パルス系とキャンベル系のオーバーラップ確認、ノイズレベルの確認を行う。

⑦ 事故時監視計装確認試験

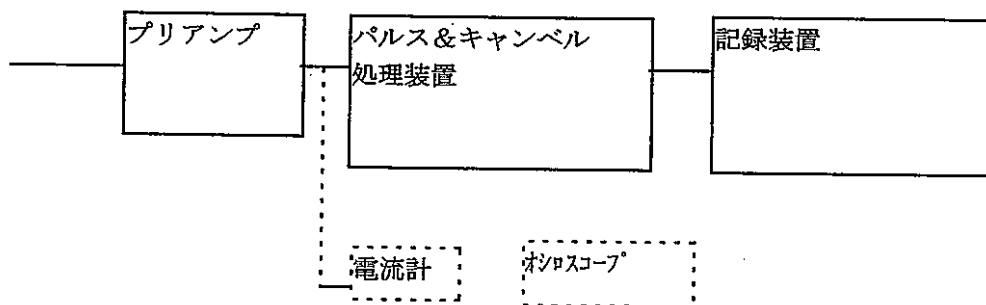
実証炉の広域系中性子検出器は事故時監視計装（PAM）に位置づけられており、事故時の原子炉停止状態を確認できることが要求されている。従って、使命期間は1日であるが、事故時にも検出器が動作することを確認しておく必

要がある。事故時条件は、温度が 650℃であるため、照射試験終了直前にヒータにより検出器温度を上昇させ、事故時の温度模擬した状態でも検出器が動作することを確認する。

(2) 照射試験データ収録システム

照射試験を合理的に遂行するためには、データの採取をスムーズに行う必要がある。そのための照射試験データ収録システムについて検討した。

試験データの採取方法に関して、検出器の信号を監視するため、基本的には、プリアンプ並びにパルス系、キャンベル系の計測を行う広域系用回路が必要になる。ここでは、システムを簡素化することで検討した。測定ブロック図を下記に示す。このようなブロックを組むことによって、例えば、プリアンプ出力を直接 A/D変換処理する装置につなぐことも可能になる。



データ収録システム概念

3. 照射装置の概念設計

3.1 照射装置の構成

照射装置の全体構成を図 3.1-1 に示す。照射装置は、原子炉内に設置する「照射装置本体」と炉外に設置する「計測制御設備」とで構成する。

照射装置本体には「中性子検出器」および中性子検出器を加熱昇温するための「加熱設備（電気ヒータおよび熱電対）」、炉心出口温度を計測するための「炉心出口温度計（熱電対）」、照射量を計測するための「フラックスモニタ」を設けている。

計測制御設備は、中性子検出器信号を処理する「プリアンプ」と「測定回路」、ヒータ制御を行う「ヒータ制御設備」からなる。炉心出口温度計（熱電対）信号は既設回路へ伝達する。

3.2 照射装置の概念設計

3.2.1 構造検討

(1) 設置場所と取合寸法

照射装置本体は、炉心第 3 列の CRD 予備穴に設置する。CRD 予備穴の取合図を図 3.2-1 に示す。

(2) 照射装置本体の構造

中性子検出器を 2 体同時に照射する場合の照射装置本体全体構造図を図 3.2-2 に、照射装置本体の下端部分の詳細図を図 3.2-3 に示す。また、照射装置本体の内部構造である中性子検出器組立図および中性子検出器保持管組立図を図 3.2-4 に示す。なお、中性子検出器を 1 体ずつ照射する場合の照射装置の詳細図を図 3.2-5 に示す。

設置部のスペース条件および炉内への挿入・引抜方法を考慮し、照射装置本体は炉心上部機構上面（CRD 据付面 GL-3136）に CRD と同様の六角フランジ構造により据え付けることとした。炉内カバーガスのシール構造も CRD と同様に据付穴内面での円筒シールとした。中性子検出器下端位置（2 体同時照射時；炉心頂部 GL-9490 上方 275mm、個別照射時；炉心頂部 GL-9490 上方 130mm）及び炉心出口温度計下端位置（炉心上部機構下面位置 GL-9460）は、以下の点を考慮し設定した。

- a) 炉心との干渉防止
- b) 照射試験上の要求からくる放射線強度
- c) 炉心燃料集合体出口流れの流路確保
- d) 炉心燃料集合体出口温度の計測

照射装置本体は「上部案内管組立」「中性子検出器保持管組立」および「中性子検出器組立」で構成する。

外管である「上部案内管組立」は不活性ガスを内包した気密構造であり、下部は炉内ナトリウムのバウンダリを、上部は炉内カバーガスのバウンダリを形成する。また、上部案内管の内面には「炉心出口温度計（熱電対）」を設置しており、温度計の先端は炉心燃料集合体の直上に位置している。温度計の応答性を確保するため上部案内管の先端部は細径構造としてある。また、炉心燃料集合体の出口流れの流動性を確保するため上部案内管の先端部は円錐構造とした。

内部構造である「中性子検出器保持管組立（図 3.2-4）」は、下端部で「中性子検出器組立（図 3.2-4）」を保持すると共に、中性子検出器を覆うよう「加熱設備（電気ヒータ、熱電対）」を設けている。中性子検出器は加熱設備により試験温度条件に昇温制御される。尚、自然対流による上方への熱の放散を抑制するため、中性子検出器の上部には熱しゃへい板を、加熱ヒーターの上部には対流防止リングを設けている。

「中性子検出器組立（図 3.2-4）」は、2本の中性子検出器（中性子検出器AおよびB）を絶縁材と検出器組立ロッドにより一体に組み立てている。また、中性子検出器軸線に沿って「フラックスモニタ」を組み込んでおり、実照射量を測定できるようにしている。

中性子検出器保持管組立は上部案内管への挿入・引抜が可能な2重管構造であり、上部案内管を原子炉へ設置した状態での挿入・引抜を行える。同様に、中性子検出器組立も中性子検出器保持管組立への挿入・引抜が可能な構造としてあり、照射終了後には中性子検出器組立のみを引き抜き、照射後試験施設（FMF）へ移送する。

なお、加熱ヒータ容量については、添付資料-1の試算結果に示すよう、4.5kWとした。

3.2.2 検出器取扱い方法の検討

照射装置本体の原子炉への装荷、脱荷は、炉内カバーガスのバウンダリを形成しながら実施する必要がある。装荷、脱荷は、照射装置本体に中性子検出器を組み込んだ状態で行うが、しゃへい条件および取り扱い長さの制約からCRD上部案内管取扱機を使用する。取扱図を図 3.2-6 に示す。

なお、装荷については、しゃへい上の制約が緩和されることから、特性試験用キャスクを使用し、作業性を改善することも考えられるが、この場合には取扱い長さを延

長する改造が必要となる。

脱荷した照射装置本体は、CRD上部案内管取扱機ごとメンテナンス建物内へ移送し、一旦、固体廃棄物貯蔵プールへ仮置きする。CRD上部案内管取扱機を撤去後、EXIR取扱機を設置し、ケーブルを巻き取ることにより中性子検出器組立のみを取扱機内へ収納する。その後にEXIR取扱機をFMFへ移送し、中性子検出器のPIEを実施する。図3.2-7にEXIR取扱機（下部案内管取扱機（下部））を示す。

なお、中性子検出器組立には同時照射の場合は、検出器が2体組み込まれており、太さが異なる複数のケーブルを有していることから、巻き取り時にケーブルが突っ張る恐れがある。このような現象の発生を回避するため、EXIR装置の巻取機構を改造する必要がある。脱荷の方法としては、EXIR装置による中性子検出器組立の引抜を炉上部で行うこともできる。この場合には、上部案内管及び中性子検出器保持管組立を原子炉へ設置したままの状態での中性子検出器組立のみを引き抜く。上部案内管および中性子検出器保持管組立は、一体でCRD上部案内管取扱機により脱荷する。この方法の場合には、炉上部でのクリティカル作業が長くなる。

3.3 放射化量の概略検討

照射試験装置本体を炉外に取出すためキャスクを使用することになるが、既設のキャスクで取扱える放射能の上限は、 10^5 Ci である。ここでは、照射試験による照射試験装置並びに検出器の放射化量を概略評価し、既設のキャスクで取扱い可能かどうか検討した。

評価に当たっては、以下を仮定した。

- ①照射試験装置の構造材をステンレス鋼(SUS304)とし、総重量で500kgと想定する。
- ②中性子検出器の材料はインコネル600とし、総重量で50kgと想定する。
- ③照射試験期間として660日照射したと想定する。
- ④照射試験装置の取出しは試験終了後10日後に行うものとする。
- ⑤照射中性子束は、照射装置下端の最も中性子の高い部分で一様とする。

放射化量の計算に当たっては、以下を計算式を用いた。

$$C = \frac{N_0 \cdot \int \phi(E) \sigma(E) dE}{3.7 \times 10^{10}} (1 - \exp(-\lambda t_0)) \cdot \exp(-\lambda t_1)$$

ここで

C ; 放射化量 (Ci)

N_0 ; 着目する元素の原子数密度 (10^{24} atoms)

ϕ (E) ; 中性子束 (nv)

σ (E) ; 放射化断面積 (barn)

λ ; 放射化生成物の崩壊定数 (sec^{-1})

t_0 ; 照射時間 (sec)

t_1 ; 冷却期間 (sec)

である。

また、使用するデータは、

中性子束 : 1×10^{10} nv (検出器下端での熱中性子束)

$$t_0 : 660 \text{ 日} \times 24 \text{ hr} \times 60 \text{ min} \times 60 \text{ sec} = 5.7024 \times 10^7 \text{ sec}$$

$$t_1 : 10 \text{ 日} \times 24 \text{ hr} \times 60 \text{ min} \times 60 \text{ sec} = 8.64 \times 10^5 \text{ sec}$$

とする。

以上の仮定をもとに、放射化量を計算した結果を照射試験装置については表 3.3-1 に、中性子検出器については表 3.3-2 に示す。照射試験装置トータルの放射化量としては、約 660 Ci であり、キャスクの上限値である 10^5 Ci を越えることはないと言える。

表3.3-1 照射装置の放射化量評価

標的核及び生成核 *6	構造材組成比 *5 (W ₀ /W)	標的核の存在比 *6 (N ₀ /N' ₀) (%)	標的核の原子数 *1 N ₀ (atoms) *2	放射化断面積 *3, *6 σ _{t,h} (barns)	生成核の崩壊定数 *6 λ (1/sec)	放射化量 *4 C (Ci)
⁵⁹ Co(n, γ) ⁶⁰ Co	0.25	100	12.75	37.2	4.17 × 10 ⁻⁹	2.54 × 10 ²
¹⁸¹ Ta(n, γ) ¹⁸² Ta	0.25	100	4.155	21.0	6.98 × 10 ⁻⁸	4.35 × 10 ¹
⁵⁰ Cr(n, γ) ⁵¹ Cr	20.0	4.31	51.89	15.9	2.90 × 10 ⁻⁷	3.47 × 10 ²
⁵⁸ Fe(n, γ) ⁵⁹ Fe	74.0	0.31	11.9	1.15	1.80 × 10 ⁻⁷	6.33
⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn	2.0	100	109.5	13.3	7.47 × 10 ⁻⁵	0
⁶⁴ Ni(n, γ) ⁶⁵ Ni	10.0	1.16	5.46	1.49	7.64 × 10 ⁻⁵	0
合 計						650.83

*1 ステンレス鋼 500kgに対する値

*2 $N_0 = 500\text{kg} \times (W_0/W) \times 6.02 \times 10^{23} \text{atoms/mol} \times (N_0/N'_0) / A \text{ kg/mol}$

*3 熱中性子に対する放射化断面積

*4 ファクタ2を考慮

*5 Cr、Fe、Mn、NiについてはJISよりCo、Taについては先行プラントデータを参照

*6 「放射線データブック」(地人書館)

表3.3-2 中性子検出器の放射化量評価

標的核及び生成核 *6	構造材組成比 *5 (W ₀ /W)	標的核の存在比 *6 (N ₀ /N' ₀) (%)	標的核の原子数 × 10 ²⁴ *1 N ₀ (atoms) *2	放射化断面積 *3, *6 σ _{t,h} (barns)	生成核の崩壊定数 *6 λ (1/sec)	放射化量 *4 C (Ci)
⁵⁰ Cr(n, γ) ⁵¹ Cr	15.5	4.31	0.34	15.9	2.90 × 10 ⁻⁷	2.27
⁵⁸ Fe(n, γ) ⁵⁹ Fe	8.0	0.31	0.013	1.15	1.80 × 10 ⁻⁷	3.46 × 10 ⁻³
⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn	0.5	100	0.28	13.3	7.47 × 10 ⁻⁵	0
⁶⁴ Ni(n, γ) ⁶⁵ Ni	76.0	1.16	0.42	1.49	7.64 × 10 ⁻⁵	0
合 計						2.31

- *1 インコネル600 50kgに対する値
- *2 $N_0 = 50\text{kg} \times (W_0/W) \times 6.02 \times 10^{23} \text{atoms/mol} \times (N_0/N'_0) / A \text{ kg/mol}$
- *3 熱中性子に対する放射化断面積
- *4 ファクタ2を考慮
- *5 Cr、Fe、Mn、Niについては原子炉材料ハンドブック（日刊工業新聞社）
- *6 「放射線データブック」（地人書館）

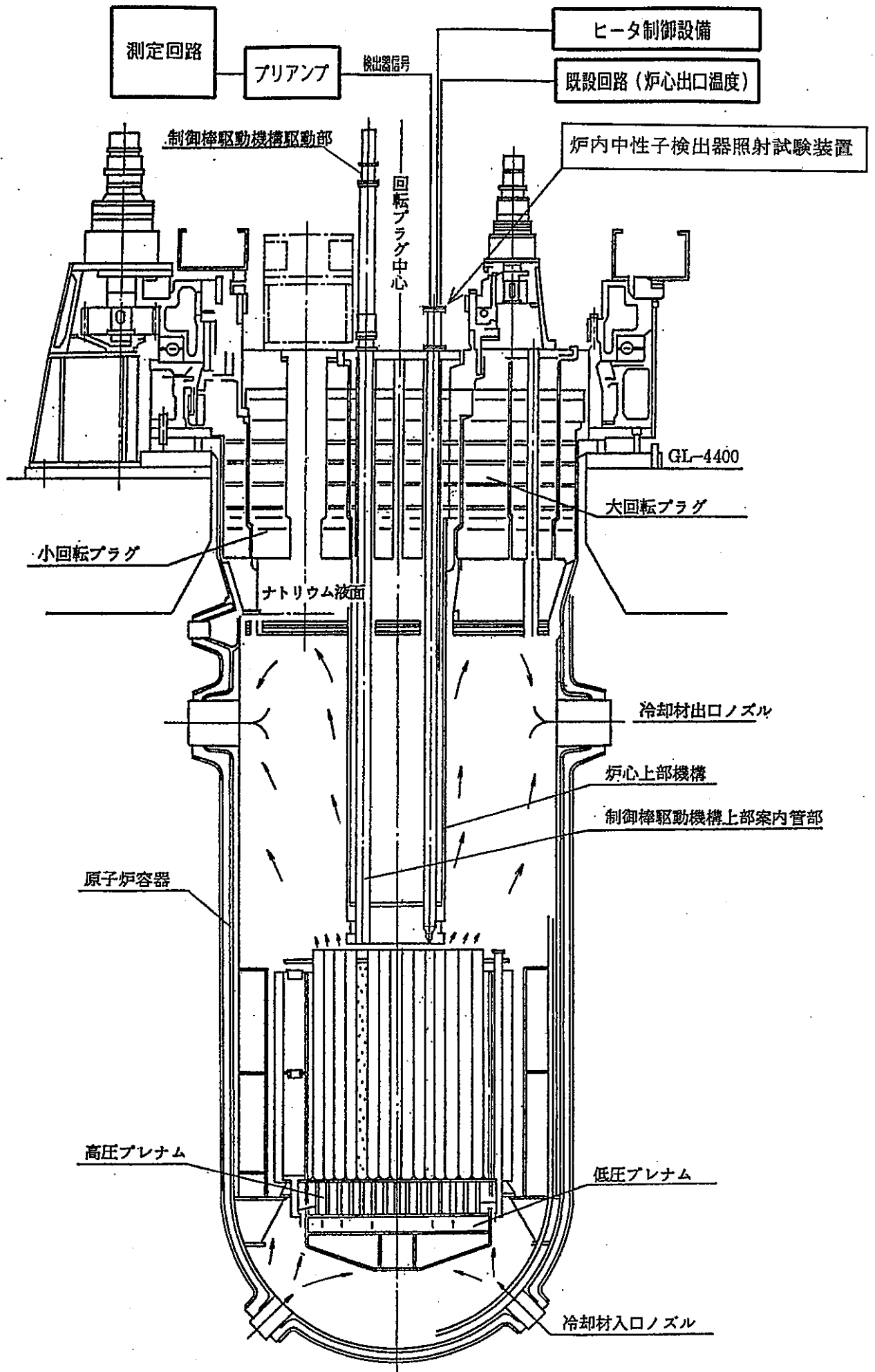
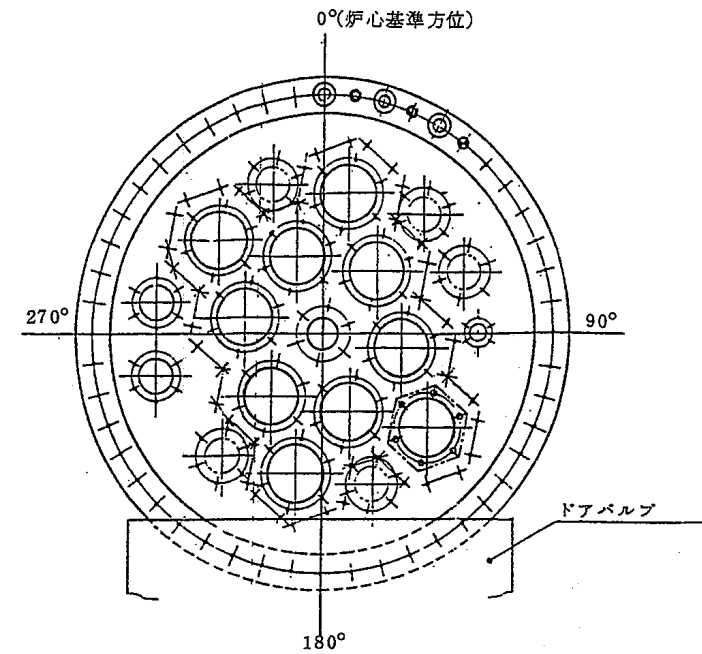
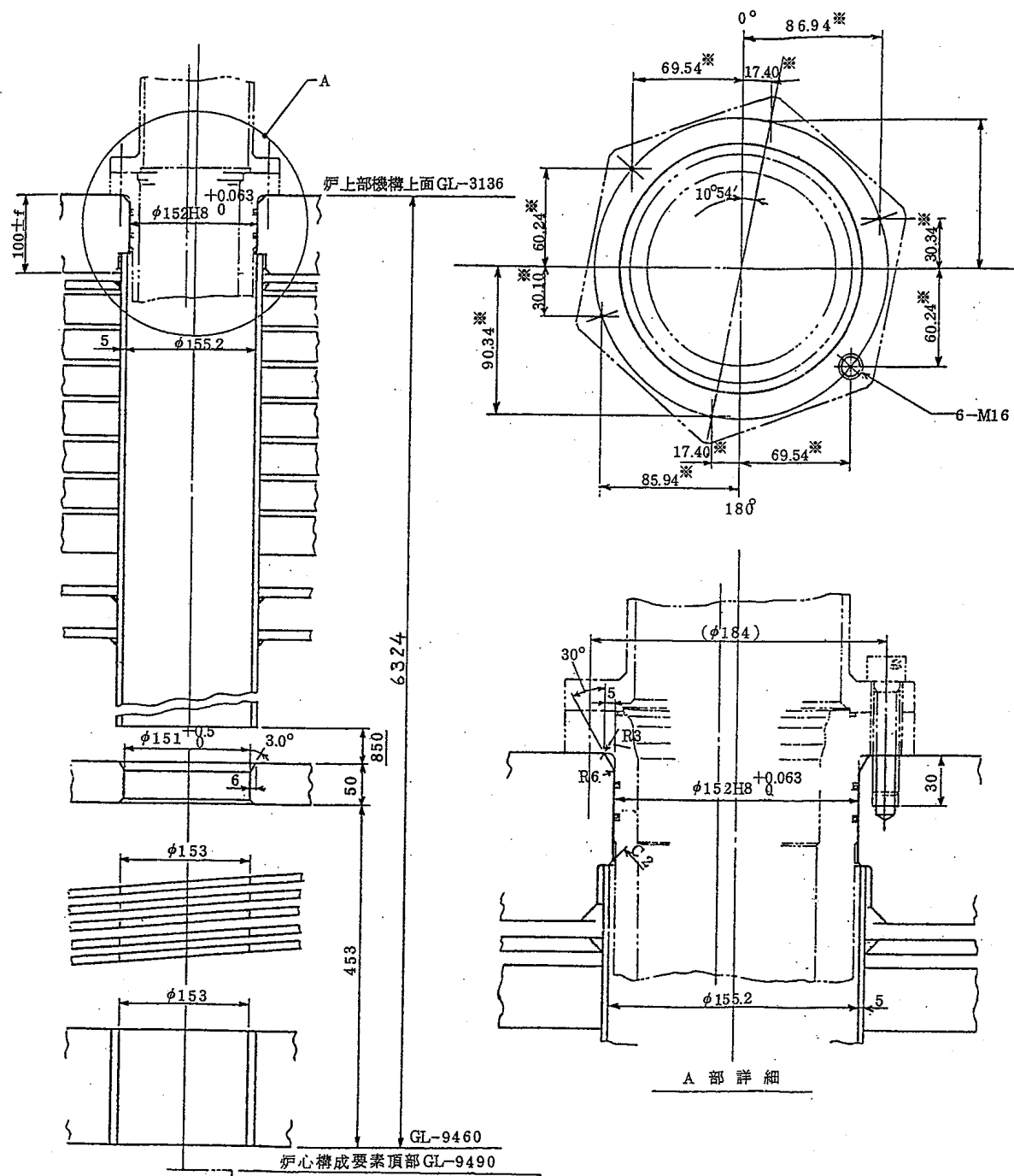


図 3.1-1 炉内中性子検出器照射試験装置全体概念図



炉心上部機構上面配置図

注記 ※印寸法の公差は±0.2とします。

図 3.2-1 CRD予備穴取合図

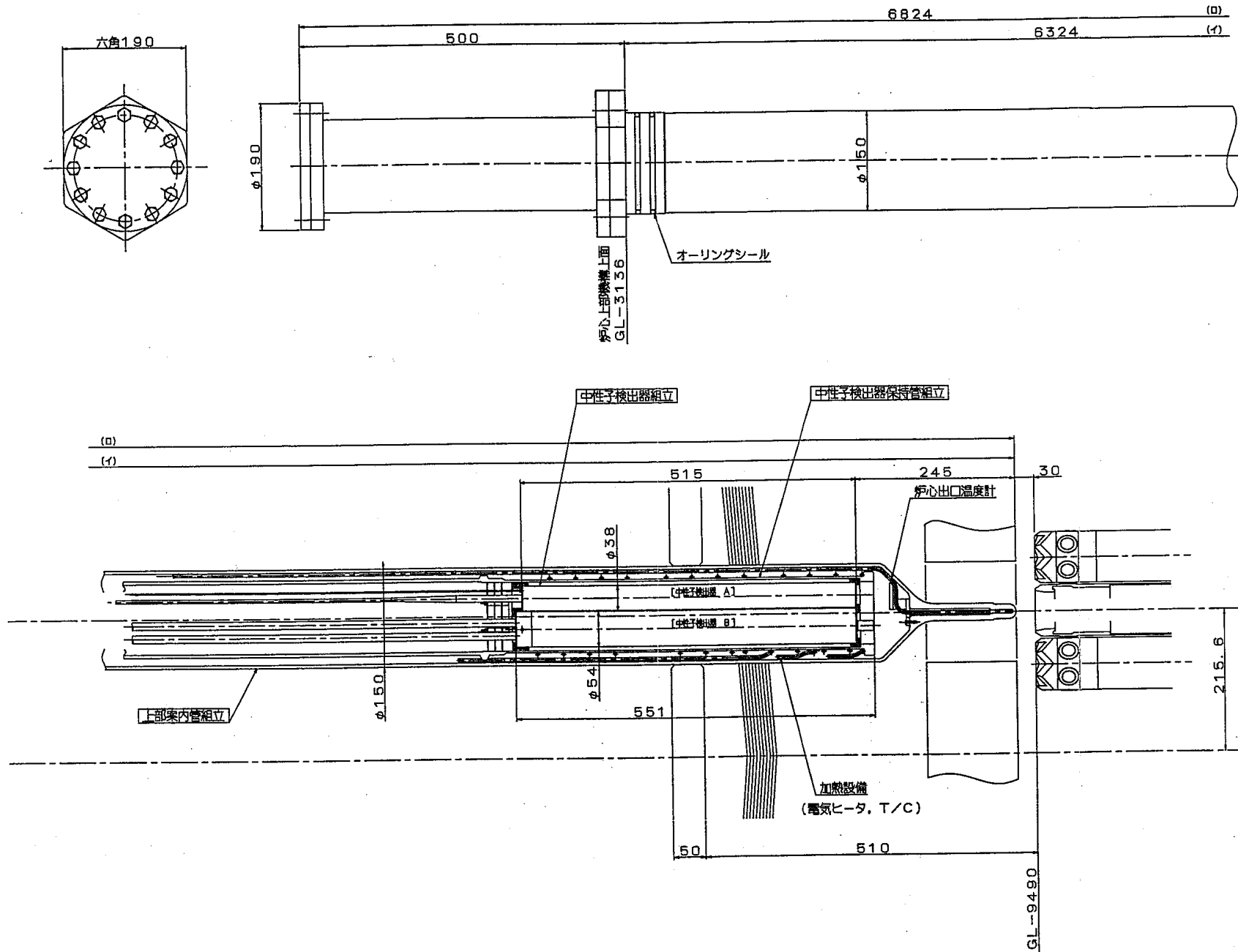


図 3.2-2 炉内中性子検出器照射試験装置本体全体図

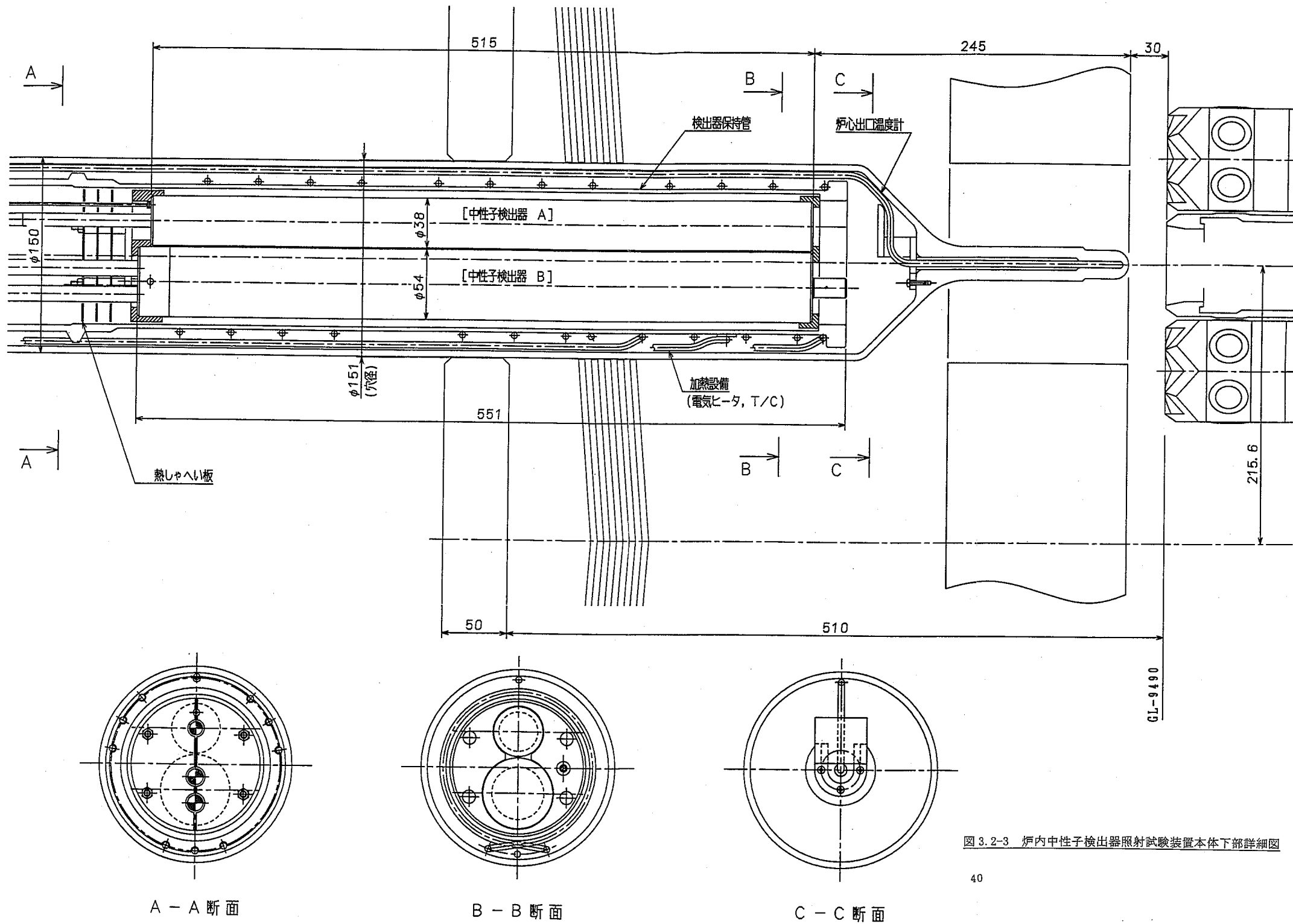


图 3.2-3 炉内中性子検出器照射試験装置本体下部詳細図

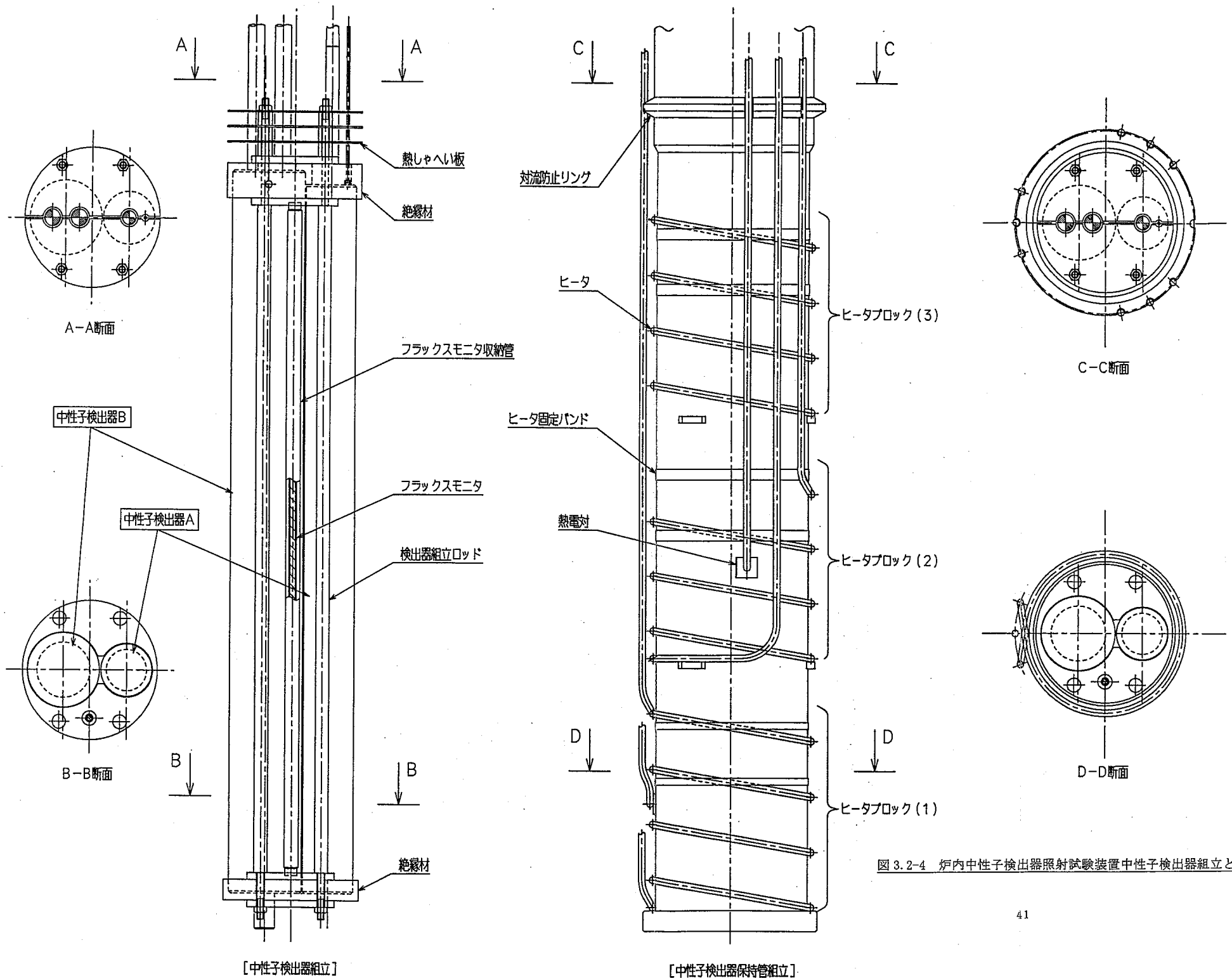


図 3.2-4 炉内中性子検出器照射試験装置中性子検出器組立と保持管組立

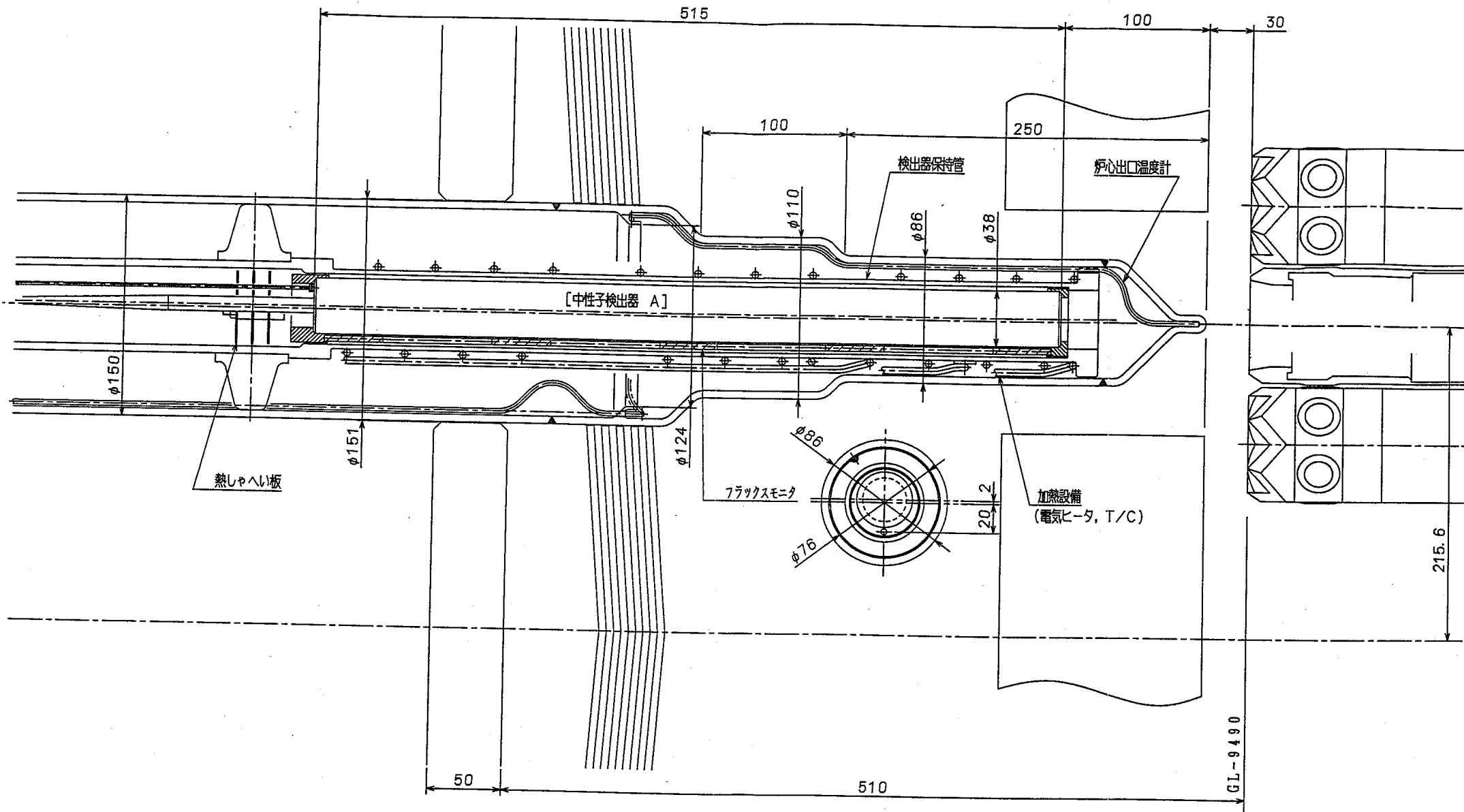
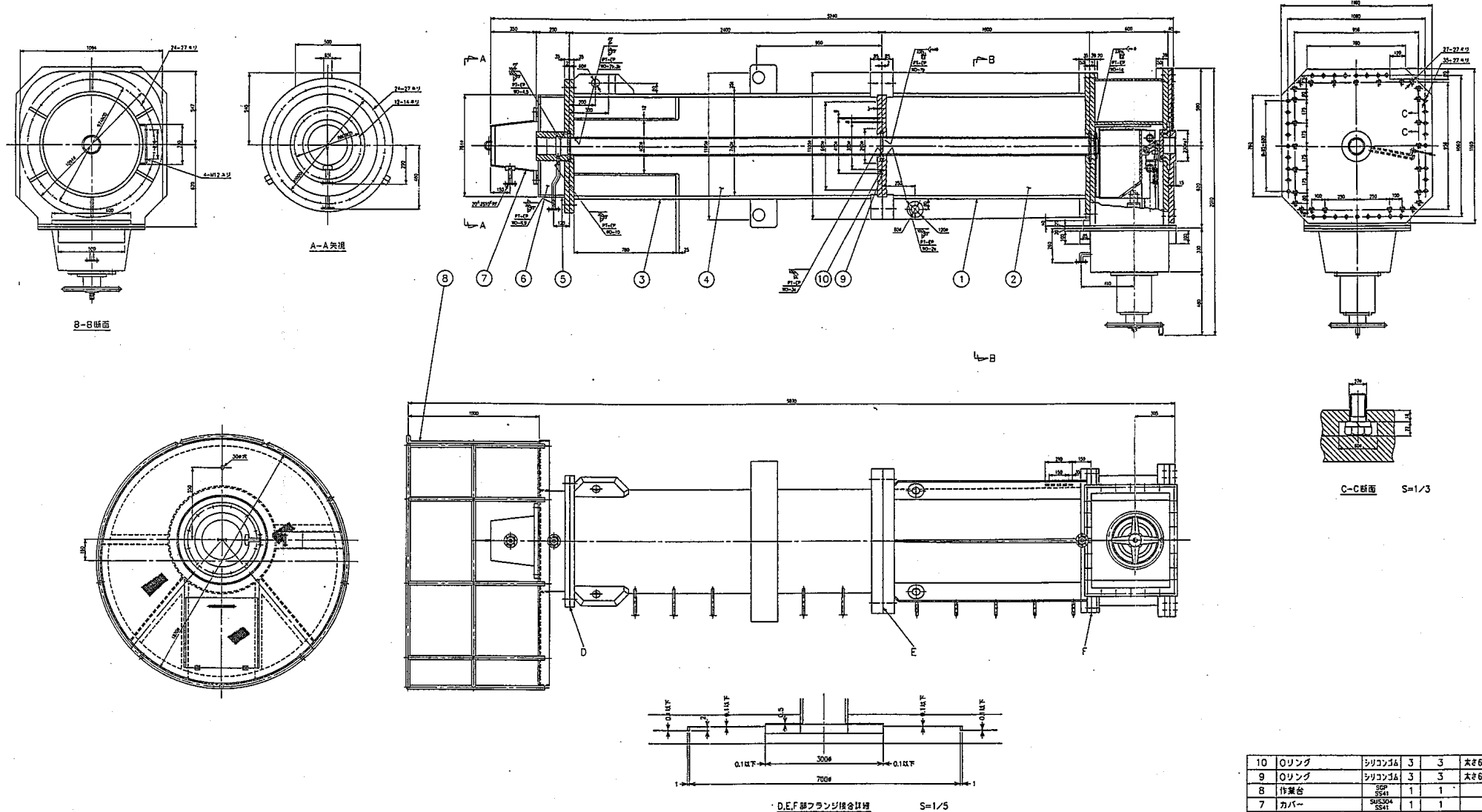


図 3.2-5 炉内中性子検出器照射試験装置 (1体収納型)



10	リング	シリコンゴム	3	3	大き68×中心径358φ
9	リング	シリコンゴム	3	3	大き68×中心径418φ
8	作業台	SGP	1	1	
7	カバー	SUS304 SS41	1	1	
6	遮断体	Pb	1式	1式	
5	シール装置	SUS304 SM419	1	1	
4	遮断体	Pb	1式	1式	
3	上部キャスク	SUS304 SM419	1	1	
2	遮断体	Pb	1式	1式	
1	下部キャスク	SUS304 SM419	1	1	
序号	品名	材質	数量	規格	備註

図 3.2-7 下部案内管取扱機キャスク全体組立図

①	74-4-4	②	73-7-10	③	73-3-24
作成	岩崎	校訂	今田	校訂	今田
1) スペーシング 2) フランジ 3) 受台	・寸法訂正 ・符号9,10追加 ・符号7付録変更 ・フランジ検査仕様	・寸法訂正 ・符号9,10追加 ・符号7付録変更 ・フランジ検査仕様	・寸法訂正 ・符号9,10追加 ・符号7付録変更 ・フランジ検査仕様	・寸法訂正 ・符号9,10追加 ・符号7付録変更 ・フランジ検査仕様	・寸法訂正 ・符号9,10追加 ・符号7付録変更 ・フランジ検査仕様

44 ARK	検査 APPROVED BY 検査 CHECKED BY	前田 73-2-12	今田 73-2-10
尺貫 SCALE	設計 DESIGNED BY 設計 DRAWN BY	今田 73-2-9	
単位 UNITS	1/15		

株式会社 東芝
TOYOSHIMA CORPORATION
TOKYO, JAPAN

図面番号 DRAWING NO.
T-8278340

3

系統番号	78
図面番号	812
訂正番号	3

4. 今後の課題

中性子検出器の照射試験を具体化していく上で、今後詳細な検討を要する内容について以下に示す。

① 照射試験装置の基本設計

照射装置の構造設計を具体化するため、以下の検討を継続実施する必要がある。

- a. 要素試験体設置方法の具体化検討
- b. シール構造の検討
- c. しゃへい条件及びしゃへい設計検討
- d. 機内ヒータ配線等引回し方法の検討
- e. ヒータ交換方法の検討
- f. 装置取扱い方法（据付／撤去）の具体化
- g. 炉上部の取合い調整

② データ収録方法の検討

照射試験を合理的に行うため、データ採取方法、収録方法を検討する。

- a. 試験データ採取方法の具体化
- b. 照射状況監視の高度化
(中性子束、ガンマ線のオンライン監視)

5. 試験工程の策定

「常陽」の運転計画に従って、照射試験装置、中性子検出器の設計、製作並びに照射時期について概略の工程を作成した。

照射試験の試験データは、FBR実証炉の設置許可において必要となるため、設置許可申請時期と整合をとる必要があるが、ここでは、照射試験は2種類の検出器それぞれについて、別々の時期に行う場合並びに2種類の検出器を同時に照射する場合のそれぞれの試験工程を策定した。2種類個別に照射した場合の試験工程を図5.1-1に、2種類同時に照射した場合の試験工程を図5.1-2に示す。

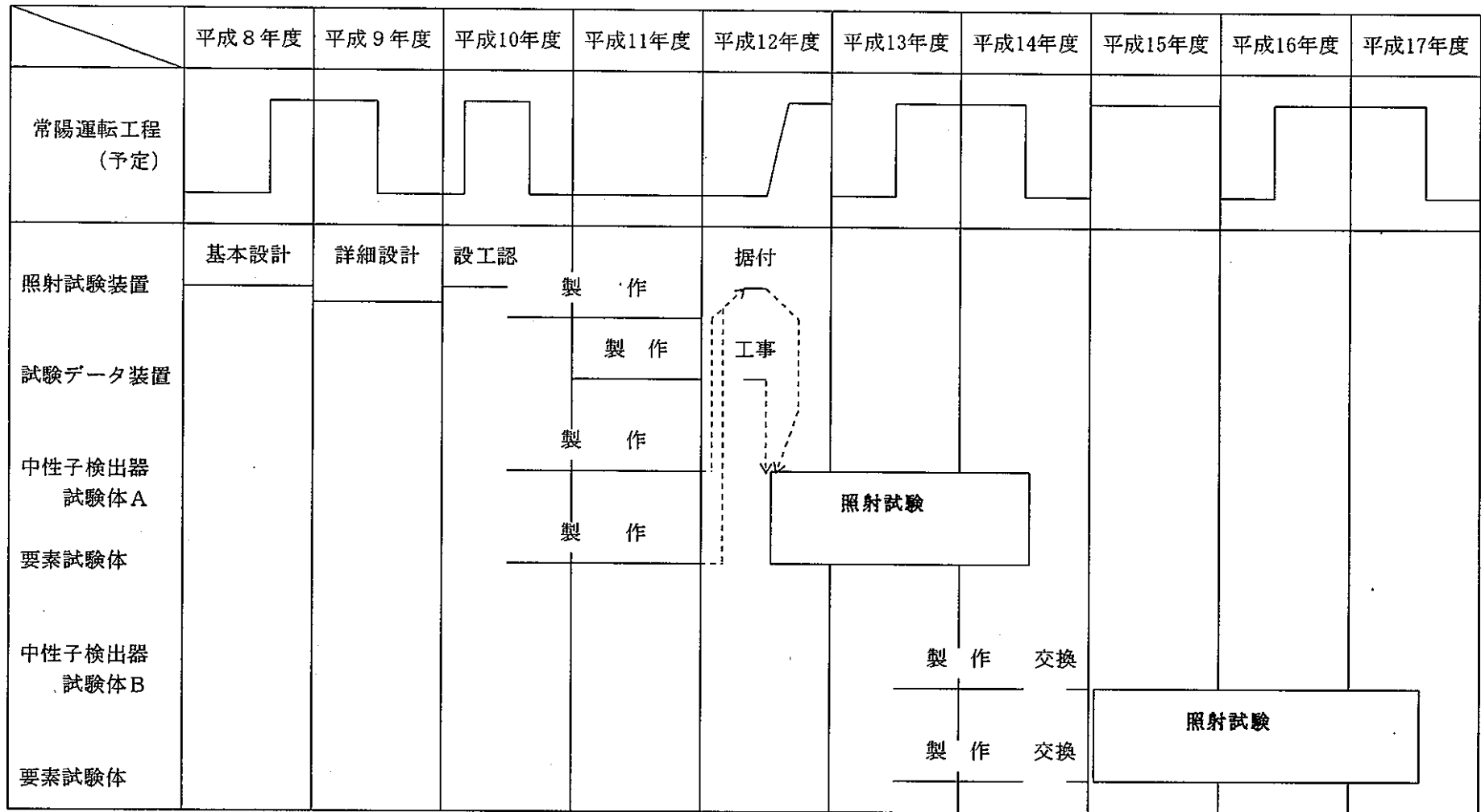


図5.1-1 中性子検出器照射試験工程（2体個別照射）

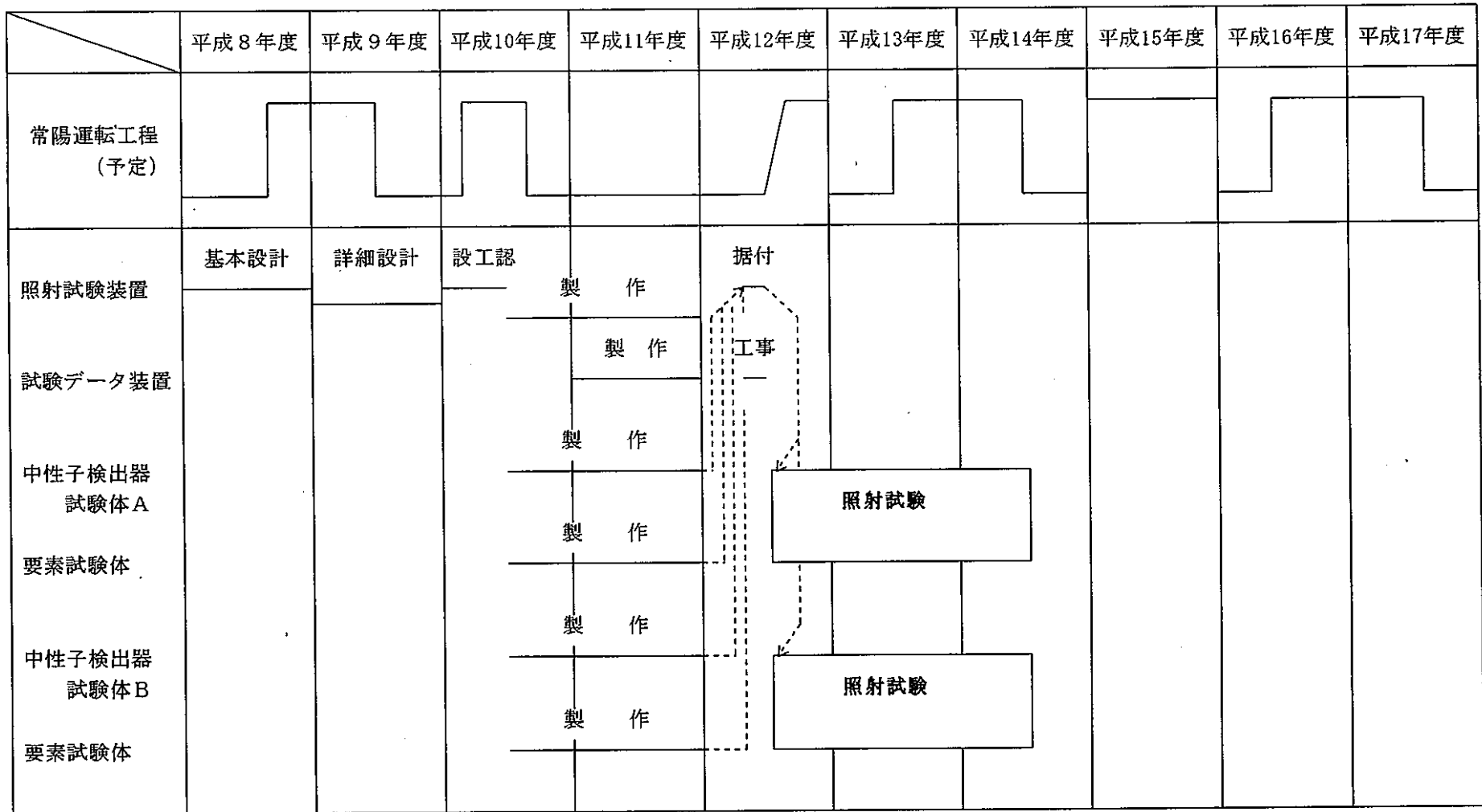


図5.1-2 中性子検出器照射試験工程（2体同時照射）

6. まとめ

FBR実証炉用広域系中性子検出器の照射試験を「常陽」にて実施する場合の予備検討として、中性子検出器の照射試験の必要性、優先度、実現方法について検討し、炉心第3列のCRD予備穴で照射した場合について検討を行った。炉心第3列の燃料集合体上部は、温度については一様と見なせるものの、軸方向に中性子束勾配が大きく、照射期間との兼ね合いから実証炉の照射条件を検出器全長に渡って満足させることが困難なことが分かった。そこで検出器の照射試験での確認内容を具体化し、検出器の照射に加え、照射量が不足する部分については、検出器を構成する部品要素の照射試験を積算照射量を満足する位置で行うことで中性子検出器の健全性検証ができることが分かった。また、ガンマ線発熱量を評価し、試験時には昇温のためにヒータが必要になることが確認できた。

中性子検出器の取扱い方法を踏まえ、照射試験を行う上で必要となる照射装置の概念を構築した。照射試験装置は、径の異なる中性子検出器を照射することを考慮した概念とした。更に、照射試験を合理的に行うため、2種類の検出器を同時に照射できるように照射試験装置の構造検討を行った。照射試験装置を取扱うため、照射試験装置の放射化量を概略評価し、既存のキャスクで取扱えることを確認した。

最後に今後の照射試験に備え、更に検討が必要な課題を整理するとともに、照射試験までに必要な実施項目について概略工程を策定した。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、検討の円滑な推進のためご尽力頂き、また貴重な御意見等によりご指導頂きました動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター実験炉部技術課青山副主研殿はじめ技術課の関係者各位並びに揃政敏副主研殿はじめ照射課の関係者各位に謝意を表し、厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 文献 2.2-1 佐久間孝志他、「国産核分裂計数管の実用化共同研究」,
PNC SN941 82-166 (1982)
- 文献 2.2-2 若山直昭、「高温用核分裂計数管型電離箱の開発研究」,
JAERI-M 85-193 (1985)
- 文献 2.2-3 George Philips Pells, "Radiation Damage Effects in Alumina"
The Journal of American Ceramic Society, Vol.77, No.2(1994)
- 文献 2.2-4 福家 賢、「MK-III炉心の中性子束・ γ 線束データの支給」,
技術課メモ、技-7-157(1996)

炉内中性子検出器照射装置 検出器加熱ヒータ容量

[加熱条件] 炉内Na温度 : 500 °C
 検出器加熱温度 : 650 °C

[ヒータ容量 Q_t]

$$Q_t = Q_c + Q_r + Q_m = 2.5 \text{ kw}$$

設置するヒータの容量は 4.5 kw とする。
 (1.5 kw ヒータ × 3 本)

○自然対流の判定

g	m/s ²	9.81
β	1/°C	1.18E-03
ΔT	°C	150
D	m	0.0125
a	m ² /s	1.32E-04
ν	m ² /s	8.71E-05
Ra	-	295

レイリー数 Ra = 295 < 1000

自然対流は発生せず、熱伝導による伝熱となる (Nu = 1)。

○熱伝導による熱通過 : Q_c

λ _{ar}	kcal/mh°C	3.35E-02
L	m	0.6
d1	m	0.115
d2	m	0.140
T1	°C	650
T2	°C	500
Q _c	kcal/h	96
	kw	0.1

○輻射による熱通過 : Q_r

ε ₁	-	0.57
ε ₂	-	0.57
fε	-	0.40
T _{1abs}	°K	923.2
T _{2abs}	°K	773.2
L	m	0.6
d1	m	0.115
A	m ²	0.22
Q _r	kcal/h	1556
	kw	1.8

○熱容量分の昇温 : Q_m

M	kg	30
C _p	kcal/kg°C	0.11
T1	°C	650
T2	°C	500
t	h	1
Q _m	kcal/h	495
	kw	0.6

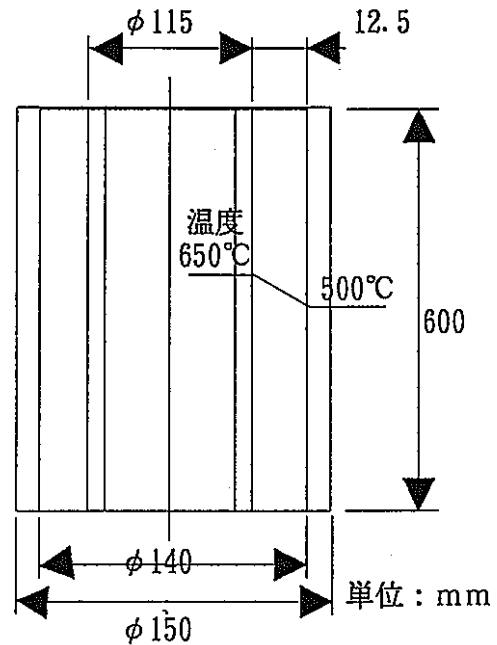
[計算式]

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{a \cdot \nu}$$

$$Q_c = \frac{2\pi \lambda_{ar} L \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right)}$$

$$Q_r = 4 \cdot 88 \cdot f \varepsilon \left[\left(\frac{T_{1abs}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{2abs}}{100} \right)^4 \right] \cdot A$$

$$Q_m = \frac{1}{860} \cdot \frac{M \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{t}$$



参 考 資 料

— 広域系中性子検出器炉外試験結果例 —

1. はじめに

F B R 実証炉向けに開発した広域系中性子検出器は、検出器の試作を通して高温耐久試験並びに原子炉試験を実施している。

以下に、その1例として試験結果を示す。

2. 試験方法

2.1 試験の概要

試験用中性子検出器を試作し、高温耐久試験として中性子検出器を常温から650℃に昇温し、その後650℃で30日間保持した。昇温途中並びに650℃保持の間、絶縁抵抗、静電容量、放電開始電圧の変化を測定し、30日後に常温に戻し、降温中のデータ採取を行った。

(なお、実際は耐久試験中1度常温に戻している。)

また、耐久試験前後で性能に変化があるかどうか確認するため、試験前後で原子炉による検出器感度、パルス波形、プラトー特性、積分波高分布特性を確認した。

2.2 試験装置

(1) 耐久試験

試験用中性子検出器を恒温槽に入れ昇温した。恒温槽には、検出器本体並びに検出器本体に近いM I ケーブルの部分が挿入されており、試験温度の制御は、恒温槽に設置された熱電対(3箇所設置)により行った。

(2) 原子炉試験

T T R (東芝訓練炉)にて実施した。従って、試験温度は常温である。

3. 試験結果

3.1 高温耐久試験中の特性変化

(1) 絶縁抵抗

a. 芯線-シールド間

高温耐久試験開始当初は650℃において $10^6 \Omega$ 程度である。高温耐久試験途中から実際の中性子検出器使用状態を模擬するため、芯線-シールド間に200Vの電圧を印加したところ、絶縁抵抗は $10^9 \Omega$ のオーダーに上昇する特性が得られた。

また、30日後の常温状態でも高温耐久試験前の約 $10^{12} \Omega$ に回復している。

芯線-シールド間の必要絶縁抵抗は、検出器プリアンプのインピーダンスに関連するが、通常検出器プリアンプの入力インピーダンスは、数十 Ω であるため、これよりも2桁以上大きくとる必要がある。従って、絶縁抵抗として $10^4 \Omega$ 以上あれば機能的には問題にならないため、650℃でも十分な絶縁性があるといえる。

b. 内シールド-外シールド間

高温耐久試験開始後650℃において $10^6 \Omega$ 程度であり安定している。なお、電圧を印可すると芯線-シールド間と同様に絶縁抵抗が上昇する。

内シールド-外シールド間は、基本的には外来ノイズ等の影響を受けないよう

にすることから考え、 $10^6 \Omega$ は十分余裕のある値であり、30日後の常温状態でも高温耐久試験前の約 $10^{10} \Omega$ に回復しており問題ない。

高温耐久試験中の絶縁抵抗の変化を図1に示す。

(2) 静電容量

芯線-シールド間、内シールド-外シールド間で温度による多少の変化はあるものの、高温耐久試験前後で変化がない。静電容量は優位な変化が認められなければ問題なく、試験結果から判断して、高温下でもセンサ構造に変化は発生していないことがいえる。

高温耐久試験中の静電容量の変化を図2に示す。

(3) 放電開始電圧

高温耐久試験中 650°C 30日間の測定では、放電開始電圧はいずれも印加電圧200V以上であり、実証炉の広域系中性子検出器として十分使用できることが確認された。

なお、放電開始電圧は0.1cps以上の計数値が観測される電圧として定義している。

高温耐久試験中の放電開始電圧の変化を図3に示す。

3.2 高温耐久試験前後の特性比較

高温耐久試験前並びに試験後に、TTRにて検出器の特性比較を行った。

(1) パルス波形

高温耐久試験後に、原子炉にて照射した際のパルス波形を写真1に示す。パルス幅として約80nsecであり、正常な波形を示している。

(2) プラトー特性

高温耐久試験前後で同様の特性が得られ、温度の影響による性能変化はないことが確認された。

高温耐久試験前後の常温プラトー特性を図4に、原子炉による照射によるパルスプラトー特性を図5に示す。

(3) 積分波高分布特性

高温耐久試験前後で同様の特性が得られ、温度の影響による性能変化はないことが確認された。

高温耐久試験前後の積分波高分布特性を図5に示す。

(4) パルス感度

高温耐久試験前後で測定したパルス感度に変化はなく、高温下でウランの剥離等は生じていないことが確認された。

4. まとめ

広域系中性子検出器の試験体を製作し、高温耐久試験並びに原子炉試験を実施した。耐久性試験では、検出器の温度昇温中、一定温度保持中、温度降温中いずれの場合も電気特性として機能を満足する良好な結果が得られた。また、原子炉試験として、高温耐久試験前後で検出器の性能に変化がないことを確認した。これによって、実証炉での広域系中性子検出器の仕様である寿命4年並びに事故時モニタとしての使用条件を満足できる見通しが得られた。

最終的な性能に関しては、今後予定されている原子炉照射試験結果によって判断するものとする。

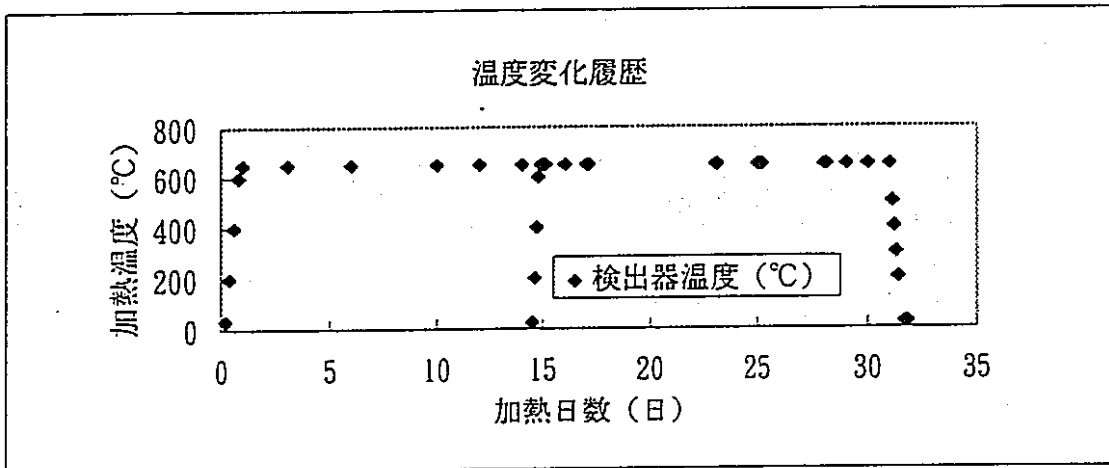
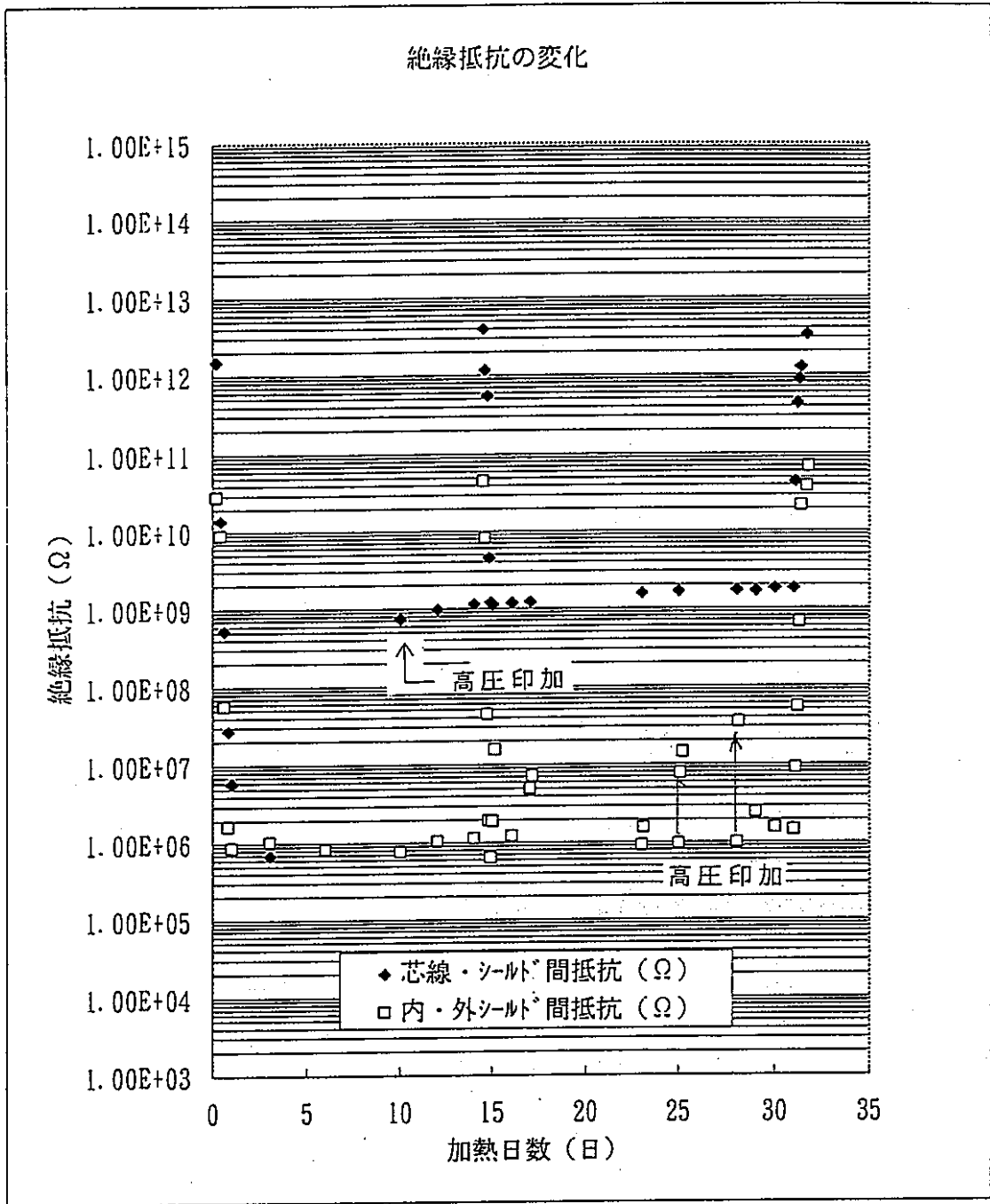


図 1 絶縁抵抗の変化

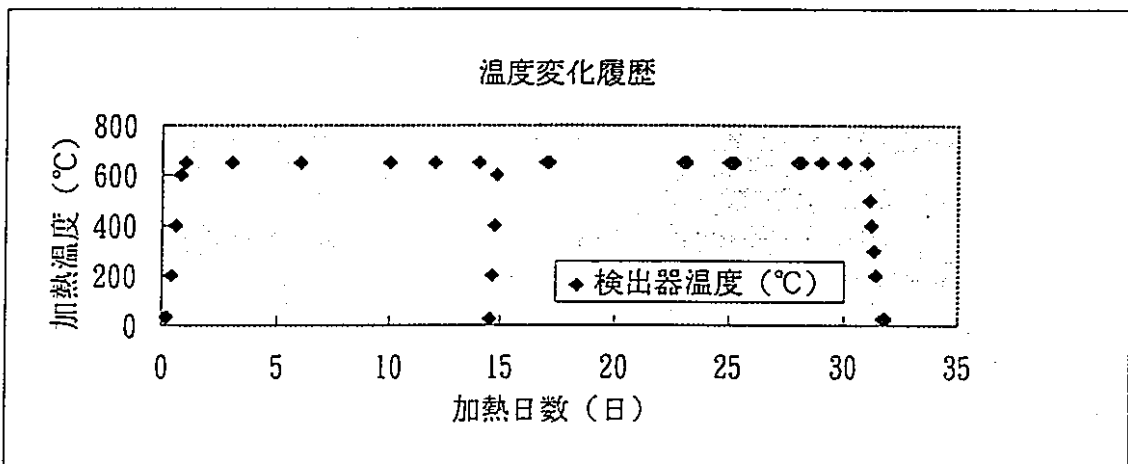
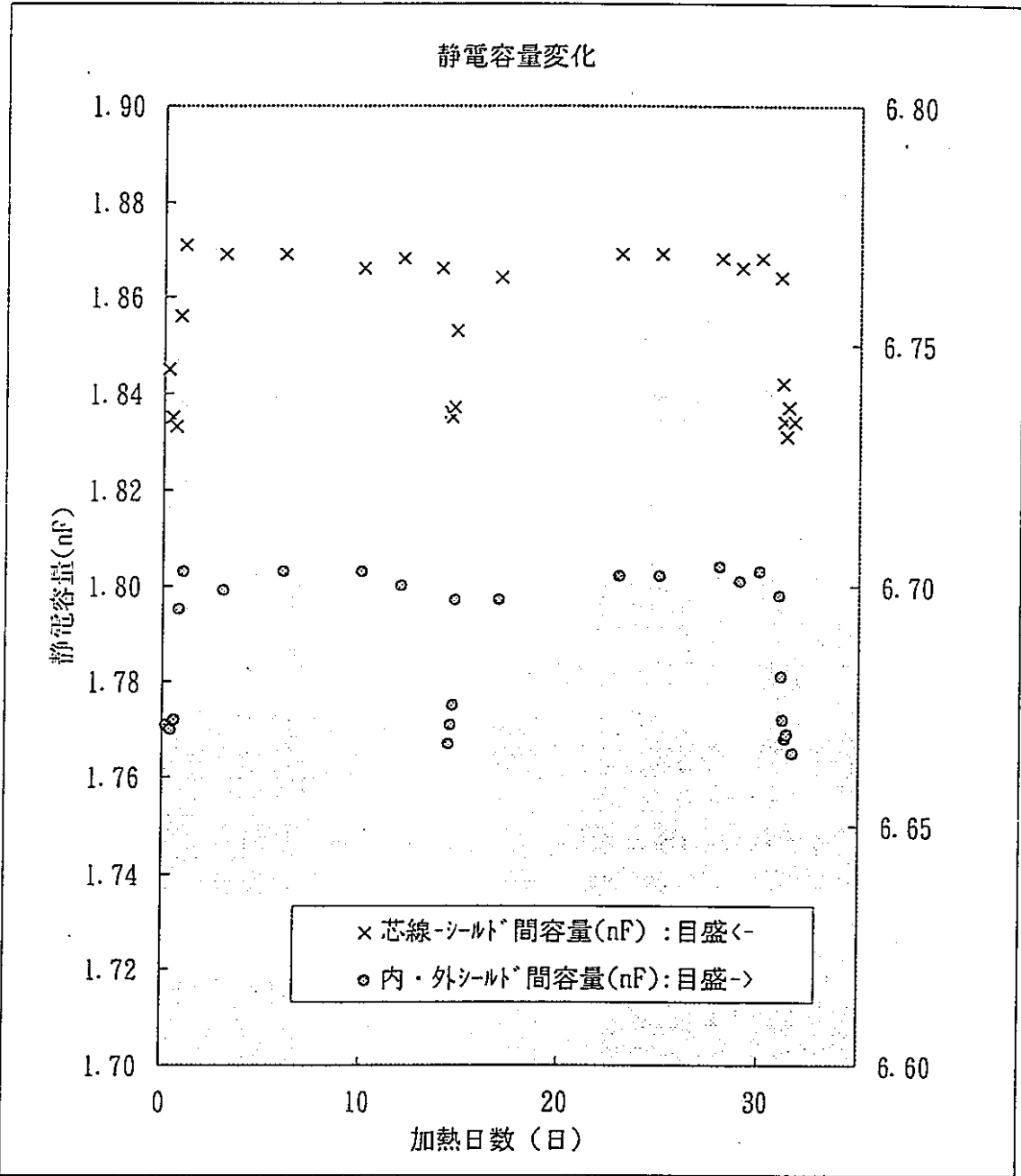


図 2 静電容量の変化

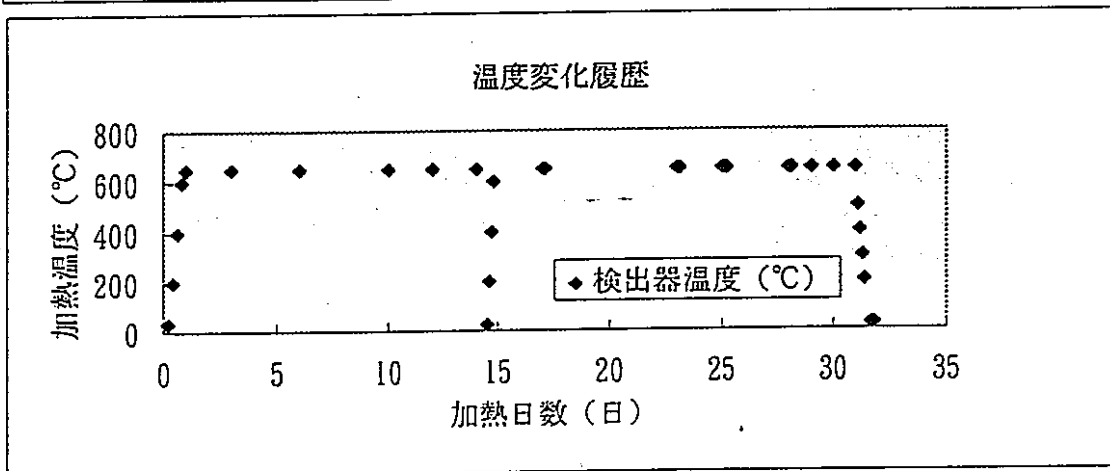
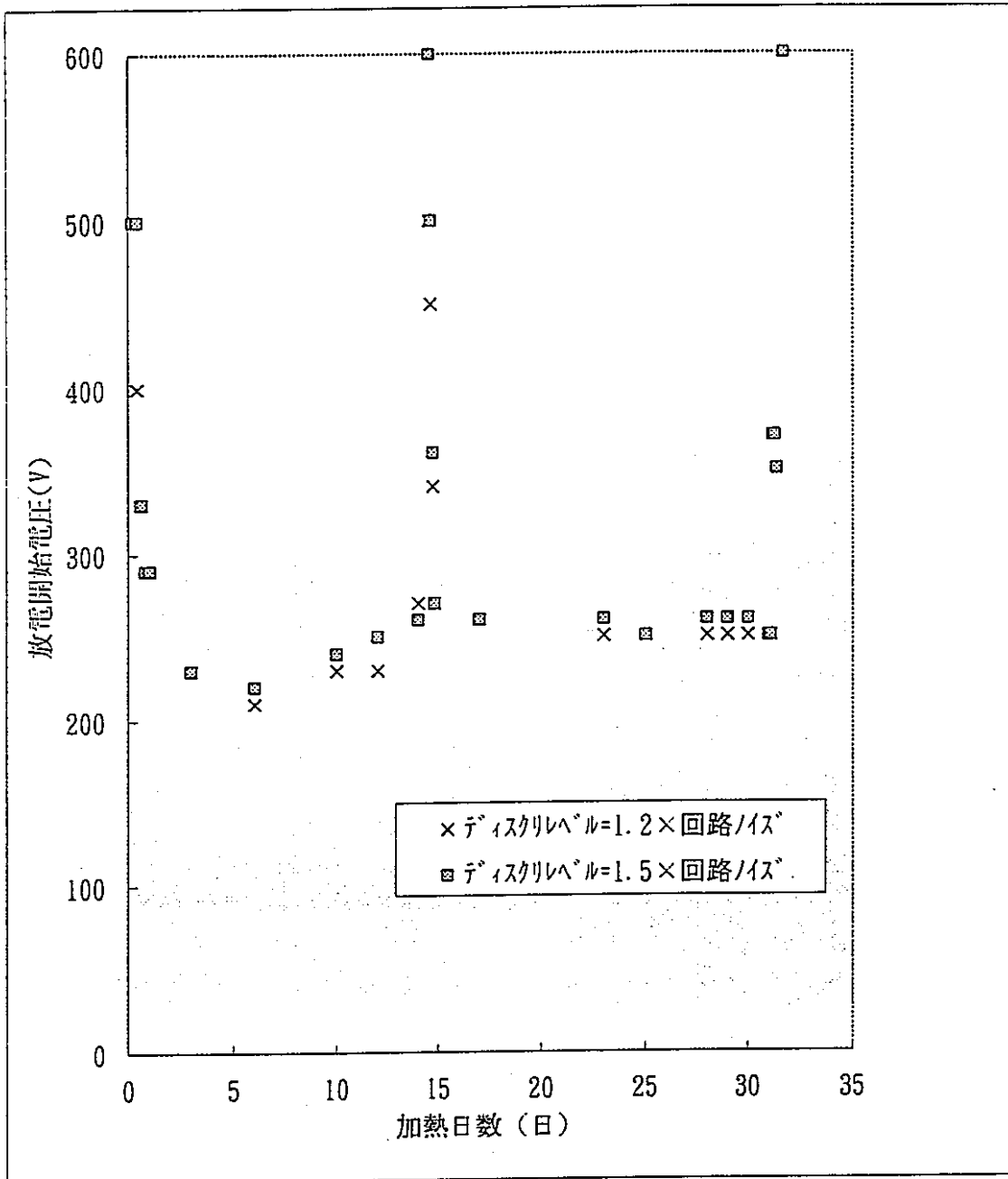


図 3 放電開始電圧の変化

加熱前後の常温プラトー特性

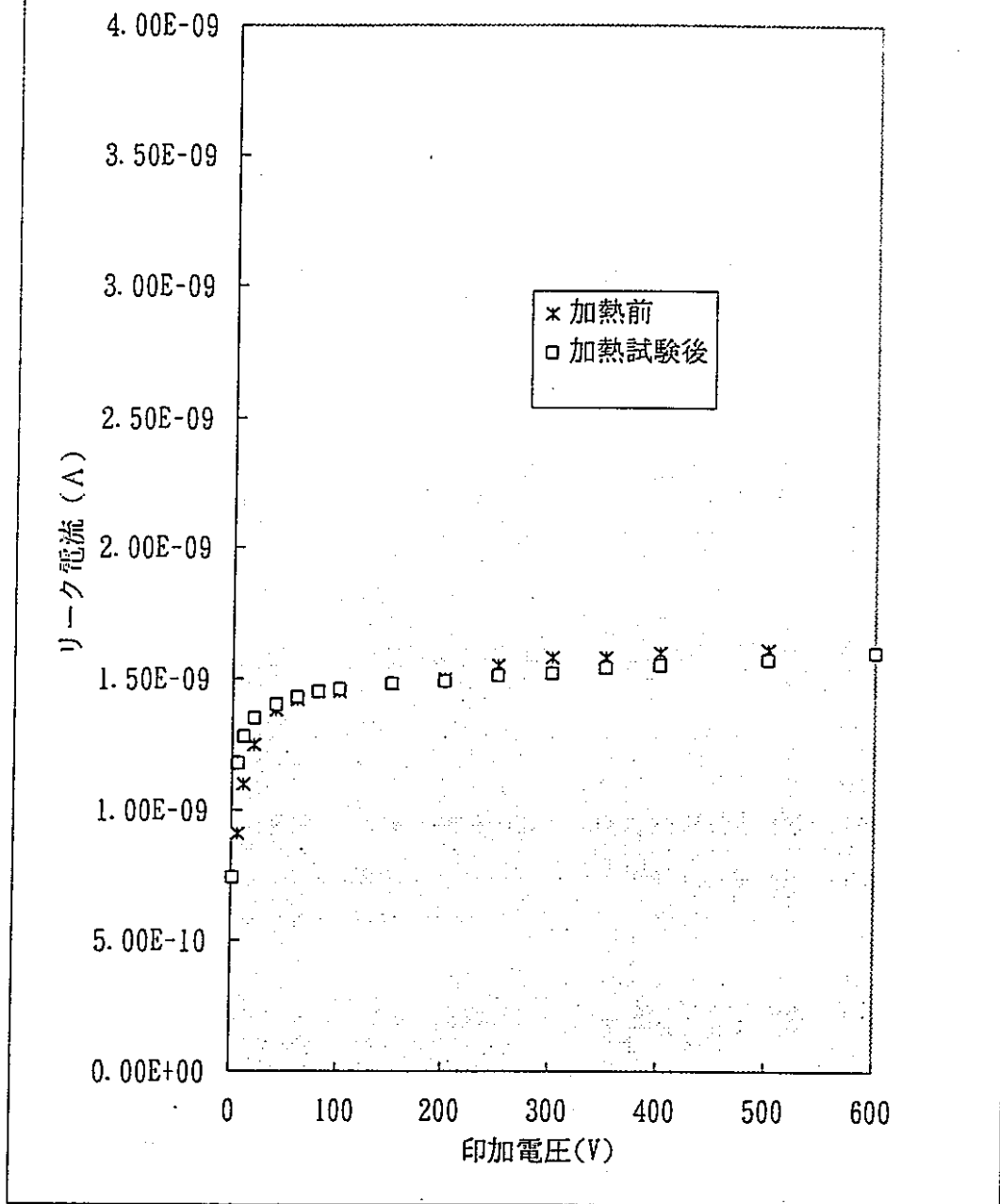


図 4 常温プラトー特性

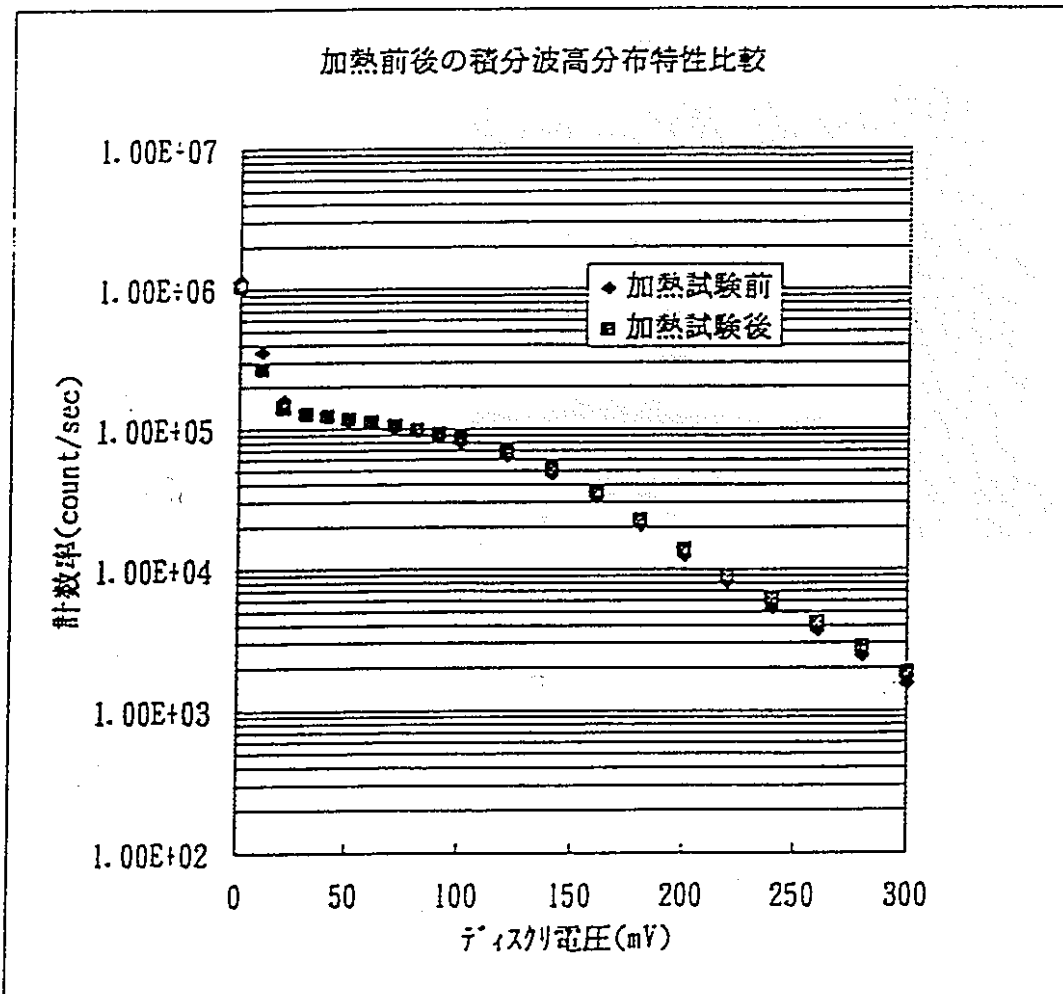
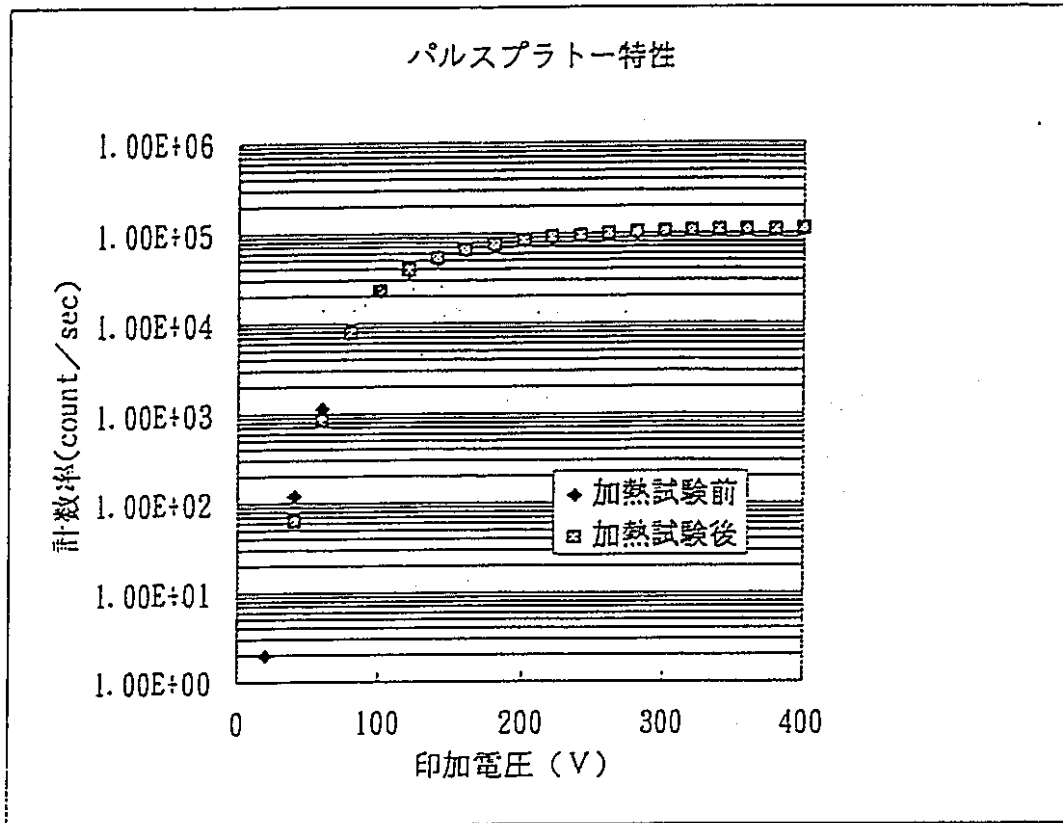


図 5 パルスプラトー特性と積分波高分布特性

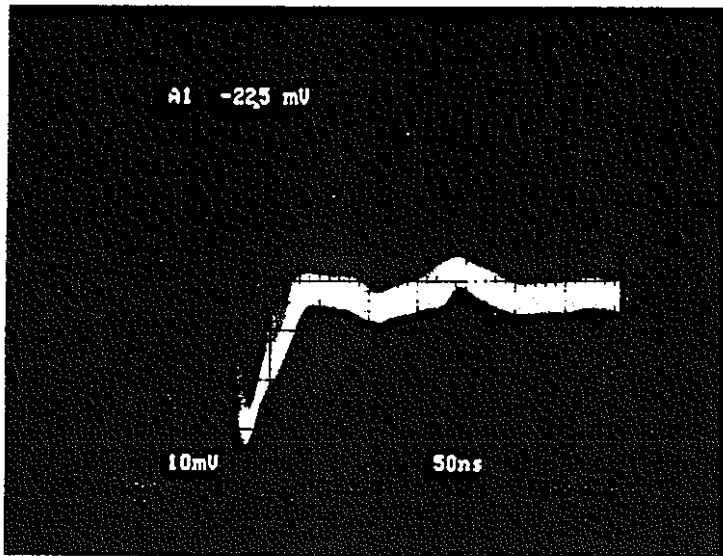


写真 照射前 7°LiF 出力
パルス波形

7°LiF :SRNM($50\ \Omega$)
 印加電圧:200V
 検出器温度:常温
 縦軸:10mV/div
 横軸:50nsec/div

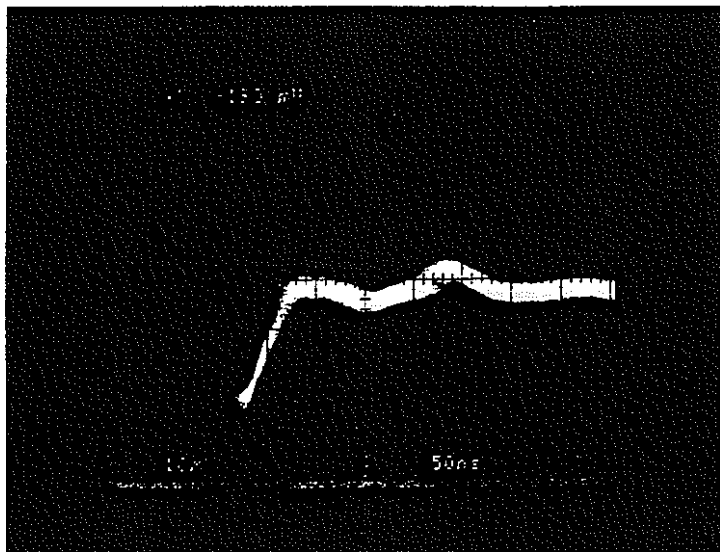


写真 照射後 7°LiF 出力
パルス波形

7°LiF :SRNM($50\ \Omega$)
 印加電圧:200V
 検出器温度:常温
 縦軸:10mV/div
 横軸:50nsec/div

写真 1 パルス波形