

高速実験炉「常陽」における流量制御型照射装置の開発

— 開発の現状と課題 —

1998年5月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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下さい。

〒311-1393 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-chō, 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) 1998

高速実験炉「常陽」における流量制御型照射装置の開発

－開発の現状と課題－

揃 政敏*、宮川 俊一*

要 旨

本報は、高速実験炉「常陽」において、流量過渡事象下での燃料の破損限界試験を行うことを主な目的とした、流量制御型照射装置 (FLORA: Flow Control Irradiation Facility) の開発の現状と課題について報告するものである。FLORAは、米国EBR-II炉の照射装置であるFPTF (Fuel Performance Test Facility) とBFTF (Breached Fuel Test Facility) を合体したような装置で、EBR-IIでの不具合情報を生かし、流量調節にナトリウム浸漬式のアニュラー型電磁ポンプ (A-LIP: Annular Linear Induction Pump) を採用したことを特徴としている。

FLORAの基本的なシステムの成立性はMK-II炉心条件下で確認しているが、今後の実用化のためには、MK-III炉心条件への見直しの他、幾つかの課題の解決と装置構造の詳細化を図って行く必要がある。

FLORA開発におけるこれまでの主な成果と今後の課題は、以下のとおりである。

(1) 開発の主な成果

- ① 破損燃料から放出される遅発中性子先行核に基づく中性子を、FLORAに装備した中性子検出器で十分な感度をもって検出可能であることを評価した。
- ② キーコンポーネントである流量調節用A-LIPの、長さ1/2サイズでの炉外ナトリウム中試験まで終えた。その結果、FLORA用ポンプの要求性能である550℃のナトリウム中で流量300l/min吐出圧力265kPaを達成できる見通しを得た。
- ③ 想定した試験用燃料体の冷却材流量を、A-LIPの流量調節機能によってオンパワー時に100%～40%程度まで調節可能で、このことによって燃料被覆管温度を十分に制御可能であることも確認された。

(2) 今後の課題

- ① プロセス検出器の開発としては、遅発中性子検出器の小型化が必要な他、電磁流量計用永久磁石の使用環境 (高温と中性子照射) による減磁の影響を確認する必要がある。
- ② A-LIPについては、中性子照射による影響が残された課題である。このため、短尺のポンプの照射を行い、特性や絶縁性能を確認する必要がある。
- ③ 装置の性能をより確実なものとするため、水流動試験を行い詳細な圧力損失データを得る必要がある。

なお、今後のFLORA開発については当面凍結し、燃料開発の進展状況とMK-IIIにおける炉の利用計画の状況によって進める予定である。

*大洗工学センター 実験炉部 照射課

Development of the Flow Control Irradiation Facility for JOYO

Masatoshi Soroi* , Shun-ichi Miyakawa*

Abstract

This report describes the present situation and problems with the development of the flow control irradiation facility (FLORA) . The purpose of FLORA is to run the cladding breach (RTCB) irradiation test under loss of flow conditions in the experimental fast reactor "JOYO". FLORA is a facility like FPTF (Fuel Performance Test Facility) plus BFTF (Breached Fuel Test Facility) in EBR-II, USA. The technical feature of FLORA is its annular linear induction pump (A-LIP), which was developed in response to a need identified through the experiences in the mechanical flow control of FPTF.

We have already designed the basic system facility of FLORA for the JOYO MK-II core. However, to put FLORA to practical use in the future, we have to confirm the stability of the JOYO MK-III core condition, solve problems and improve the design.

The main results and problems of the development of FLORA are as follows;

(1) The results of the development:

- The neutron detector in FLORA can detect the delayed neutron which is emitted from failed fuel.
- Out-of-pile A-LIP tests in sodium conditions has been completed. (The length of the tested A-LIP is half the actual size.) Out-of-pile test results showed that the A-LIP achieved a 300l/min flow rate and 265kPa pressure in 550°C sodium. This pump performance satisfied the FLORA requirements.
- By controlling the sodium flow rate from 40 to 100% using the A-LIP, we can control the fuel cladding temperature satisfactorily.

(2) The problems:

- In the development of the process detector, it is necessary to miniaturize the neutron detector and test the effect of neutron irradiation and high temperatures on the permanent magnet in the flow meter.
- The problem which is left about A-LIP is its influence on neutron irradiation. For this purpose, we have to irradiate a small size A-LIP and test its characteristics and electric isolation.
- To get more accurate results concerning the efficiency of the A-LIP, we have to get pressure loss data for FLORA through a water flow examination.

We are going to freeze and review the FLORA project, taking into consideration the fuel development situation and the research project of JOYO MK-III core.

*Irradiation Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 開発の経緯	2
3. 装置の概要	3
4. 構造・機能	5
4.1 試験機能	5
4.2 装置の設計条件	5
4.3 機能および構造の設計検討	10
4.4 試験用燃料の検討	22
4.5 課題の整理	25
5. 開発計画	49
6. 結 言	51
6.1 開発の成果	51
6.2 開発の課題	51
6.3 今後の計画	52
7. 謝 辞	53
8. 参考文献	54
別添資料	55

表リスト

表-1 検出機器類の概略仕様	27
表-2 流量調節用電磁ポンプの要求仕様	27
表-3 試験用燃料体からの核種放出量	27
表-4 信号成分の中性子束	28
表-5 バックグラウンド成分の中性子束	28
表-6 DND位置のS/N比	28
表-7 DNDの計数率	28
表-8 「常陽」照射装置による電磁流量計(EMF)の使用実績	29
表-9 A-LIPを用いた流量調節機構の比較検討結果	29
表-10 試作コイルの仕様と試験結果	30
表-11 短尺モデル電磁ポンプの試作仕様と実測性能	30
表-12 流量調節用電磁ポンプの概略仕様	31
表-13 装置各部の圧力損失	31
表-14 FLORA開発工程(案)	50

図リスト

図-1 流量制御型照射装置 (FLORA) の全体構造	4
図-2 DND感度評価計算モデル	32
図-3 計測線付集合体用電磁流量計の構造	33
図-4 電磁流量計概略構造	33
図-5 FLORAシステム検討図	34
図-6 電磁ポンプ (1/4短尺モデル) 絶縁抵抗の推移	35
図-7 電磁ポンプ (1/4短尺モデル) コイル温度の推移	36
図-8 電磁ポンプ (1/4短尺モデル) の性能	37
図-9 電磁ポンプ (1/2短尺モデル) コイルの絶縁抵抗	38
図-10 電磁ポンプ (1/2短尺モデル) コイル温度 (Na温度530℃)	39
図-11 電磁ポンプ (1/2短尺モデル) の性能 (Na温度530℃)	40
図-12 電磁ポンプ (1/2短尺モデル) 構造図	41
図-13 FLORA用電磁ポンプの予想性能 (Na温度550℃)	42
図-14 試験用燃料体との着脱機構構造図	43
図-15 FLORAの圧力損失と流量調節範囲	44
図-16 流量制御型照射装置 (FLORA) 全体組立構造図	45
図-17 試験用燃料体構造図 (B型特殊燃料集合体の例)	46
図-18 圧力損失とB8の流量調節範囲	47
図-19 圧力損失とC6の流量調節範囲	48

1. 緒 言

流量制御型照射装置 (FLORA: Flow Control Irradiation Facility. 以下、「FLORA」または「(本)装置」と言う)^{1)~3)}は、「常陽」において流量過渡事象下における燃料の破損限界等を把握し、燃料の許容設計限界を明らかにすることを目的とした照射装置である。

FLORAは、米国EBR-II⁴⁾の同様な照射装置であるFPTF (Fuel Performance Test Facility)やBFTF (Breached Fuel Test Facility)を参考にして、「常陽」の制限条件や想定される試験条件に合わせて独自の構造や流量調節機能、着脱機能等を持たせた計測線付の照射装置である。

本装置による燃料の破損限界試験は、原子炉定格運転中に装置内を流れるナトリウム (Na) 流量を調節することによって、装置下側の炉心部に装荷した試験用燃料体のNa冷却材流量を間接的に調節して、流量過渡 (減少) 事象を発生させることにより燃料被覆管温度を上昇させ、燃料が破損に至るまでの挙動を測定するものである。装置内には、流量過渡事象を発生させるための流量調節機構、燃料破損検出のための遅発中性子検出器 (DND: Delayed Neutron Detector)、温度計、流量計等が装備される。

開発の状況としては、MK-II炉心*条件下でのシステムの成立性を確認している他、装置のキーコンポーネントで流量調節機構に用いられるNa浸漬式のアニュラー型電磁ポンプ (A-LIP: Annular Linear Induction Pump)の開発をほぼ終え、550℃のNa中で流量300l/min、吐出圧力265kPaの要求性能を確保できる見通しを得た。

FLORAの開発は平成5年以降凍結されているが、本報ではこれまでに得られた成果を基に装置開発の現状と課題について開発再開に備えてまとめ、報告するものである。

*MK-II炉心：「常陽」の第2期炉心 (炉出力100MWtの照射炉心) で、現在の炉心を言う。2002年迄にMK-III炉心 (第3期炉心、炉出力140MWtの照射炉心) に改造予定。

2. 開発の経緯

本装置は、「常陽」において破損燃料の照射挙動を調べるRBCB(Rn Beyond Cladding Breach)試験を行う目的で昭和57年度頃から開発を始め、照射62年に計画の見直しを行い平成5年度まで開発が行われた。

装置開発の当初は、EBR-IIの照射試験装置であるBFTFやFPTFを参考に進め、BFTFにFPTFの機械式流量調節機構を装備した構造の破損燃料照射挙動測定装置(JFTF: Joyo Failed Fuel Test Facility)として、昭和61年まで開発を続け、「常陽」体系でのDND感度や伝熱設計等の成立性が確認された。

その後、昭和62年に計画の見直しが行われ、①「常陽」でのRBCB試験に当面の必要性がない。②BFTFでは、破損燃料放出測定用のサンプラーは試験用燃料集合体に取り付ける方向に転換がなされた。③「常陽」では、破損燃料放出測定用のサンプラーを取り扱う場合のプラント稼働率への影響を考慮すると、BFTFと同様の方針をとる必要がある。④EBR-IIでは、機械式流量調節機構等の不具合からFPTFが失敗に終わった。等を考慮して、開発の目的をEBR-IIのようなRBCB試験のためではなく、LOF(Loss of Flow)型のトランジェント試験を主目的とした、多用途(LOF型RTCB(Rn to Cladding Breach)、RTCB制御、短期間RBCB等)のセミインパイルループの実現を目標とした。想定した試験内容の詳細を別添資料に示した。なお、装置内には破損燃料放出測定用のサンプラーは設けず、流量調節機構は動的部がなく正・負両側の流量調節ができ動作速度が速いA-LIPを採用することとした。さらに、装置名も流量制御型照射装置(FLORA)に改称した。

計画見直し後の主な成果として、装置のキーコンポーネントであるA-LIP(1/2短尺モデル)の炉外Na中での開発まで終えた他、システムの成立性の確認と基本的な構造が設定された。また、平成4年度に照射技術開発全般に渡る検討が行われ、FLORAについては、電磁ポンプの炉外Na中試験まで行い、システムの成立性を見極めることと装置の利用法の検討を行うとの方針が出された。

しかし、平成5年度末時点においても、燃料開発からのLOF型RTCB試験要求は無く、その後FLORAを利用した照射試験の候補であるLOF型のトランジェントについての検討が行われ、LOF型時の被覆管の健全性は、徐熱低下による被覆管の強度低下が破損限界に支配的な要素となるが、基本的には材料強度の問題であり、試験数などのメリットが大きい炉外試験による研究を主体とすべきであり、現状では炉内試験の必要性は無いとの議論が

なされた。

これらの理由から、FLORAの開発はA-LIPの炉外Na中試験終了時点で中断凍結されており、現在進められている燃料開発の見直しの結果として、MK-IIIでFLORAの必要が生じた場合、開発を再開する計画である。

3. 装置の概要

FLORAは、「常陽」の炉心上部機構内に装置の本体部分を配置し、装置直下の炉心部に試験用燃料体を配して、流量過渡事象下における燃料の破損限界試験を行うものである。

装置本体は、全長約7.3m、外径15cmの細長い円筒型で、その内部には燃料破損検出のための遅発中性子検出器、温度計、流量計、電磁ポンプを用いた流量調節機構、試験用燃料体と接続・切り離しを行うための駆動機構、遮へい体等を備えている。

装置は、本体の下部で試験用燃料体のハンドリングヘッドと接続して試験用燃料を冷却したNaを装置内に導くようにしており、装置内に導かれたNaは、流量調節機構を介して装置上部に配置した遅発中性子検出器の廻りを通して原子炉内に戻される。装置の主要機器である流量調節用の電磁ポンプは、外径約10cm、長さ約1.4mの円筒状で、高温のNa(~550℃)中で使用するため新たに開発したものである。燃料破損検出のための遅発中性子検出器は、装置の上部に交換可能なように配しており、その下部には炉心からの中性子を遮へいして、試験用燃料破損時に放出されるDN先行核からの遅発中性子を検出しやすくするための炭化ホウ素(B₄C)の遮へい体を配置している。装置本体の下部には、試験用燃料体との接続・切り離しが容易なようにインターフェイスを備えており、装置上部に配置した駆動用モータにより遠隔で操作される。

本装置の全体構造を図-1に示す。

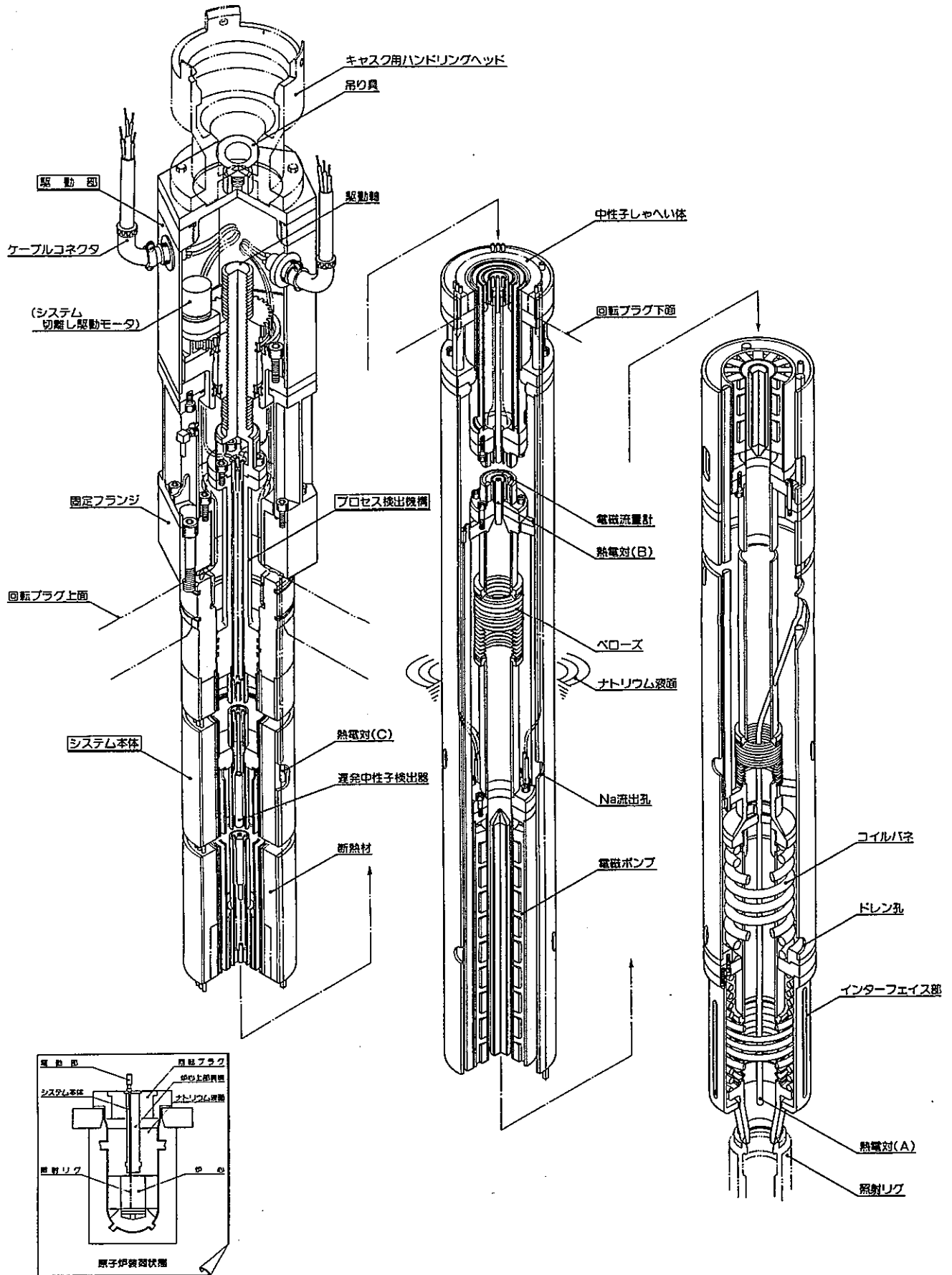


図-1 流量制御型照射装置 (FLORA) の全体構造

4. 機能・構造

4.1 試験機能

本装置は、試験用燃料体の冷却材流量が低下する事象を試験的に発生させて、燃料の破損限界を調べることを目的としている。その試験は、図-1の形態において、試験用燃料体から装置本体内に導かれる冷却材Naの量を、流量調節用電磁ポンプの駆動力を変化させて、試験用燃料体の冷却材流量が低下する事象(流量過渡事象)を試験的に発生させることによって、燃料の温度を上昇させて破損の限界を調べることにある。装置内には、燃料破損検出のための遅発中性子検出器、試験用燃料体の冷却材出口温度監視用の熱電対、Na流量監視用の電磁流量計などを装備するようにしている。本装置の設計検討においては、試験用燃料体に燃料ピン単位での試験が行える、「常陽」のB型特殊燃料集合体を使用することとした。

4.2 装置の設計条件

本装置の機能・構造の設計条件(MK-II炉心条件)について示す。

4.2.1 機能設計条件

本装置に要求される機能を示す。

(1) プロセス量計測機能

① 燃料破損検出機能

試験用燃料体に破損が生じた場合、破損燃料から放出されるDN先行核に基づく遅発中性子を検出する機能。

② 装置内の温度・流量の計測機能

装置内の温度やNa流量等を測定する機能。

(2) 流量調節機能

装置内を流れるNa流量を調節することによって、試験用燃料体の冷却材Na流量を調節する機能。

(3) 試験用燃料体と装置の着脱機能

装置本体は、燃料の冷却材を取り込むために試験用燃料体と接続ができ、さらに、燃料交換時には、回転プラグが運転可能なように切り離すことのできる機能。

4.2.2 構造設計条件

装置本体の構造設計条件を示す。

(1) プラント条件

① 原子炉熱出力

・ 100 MWt

② 運転サイクル

・ 70日/サイクル×4サイクル/年

③ 冷却材Na温度

(a) 定格運転時

・ 原子炉出口温度：500 °C

・ 原子炉入口温度：370 °C

(b) 燃料交換時：250 °C

④ 炉容器Na液面レベル

・ 定格運転中：GL-6,100 mm

・ 燃料交換時：GL-6,100 mm

・ 上部案内管交換時：GL-7,500 mm

⑤ 炉容器カバーガス圧力

・ 最高使用圧力：9.8 kPa(安全弁作動圧力)

・ 通常運転圧力：980 Pa

⑥ 軸方向取合寸法

(a) 炉心上部機構上面

・ 定格運転中：GL-3,136 mm

・ 燃料交換時：GL-3,096 mm

(b) 炉心上部機構下端

・ 定格運転中：GL-9,460 mm

・ 燃料交換時：GL-9,420 mm

(c) 燃料体頂部：GL-9,490 mm

⑦ 径方向取合寸法(制御棒予備孔取り合い寸法)

(a) 装置据付孔内径：φ 152 mm(据付シール部)

(b) 炉心上部機構フィンガー取付板穴径：φ 151 mm

(2) プロセス量計測機器類

① 遅発中性子検出器

- (a) 高温雰囲気で使用可能な核分裂計数管(FC:Fission Counter)を用いる。
- (b) 中性子遮へい体上部のドライウェル内(アルゴンガス雰囲気)に1基設置。
- (c) 概略仕様を表-1に示す。

② 流量および温度検出器

- (a) 流量計は、高温のNaの流量計測が可能で、かつ小型であること。
- (b) 温度検出器は、シース型のK(C.A)熱電対を用いる。
- (c) 概略仕様を表-1に示す。

(3) 流量調節機構

- (a) アニュラー型電磁ポンプ(A-LIP)を用いて、Na流量の調節を行う。
- (b) 電磁ポンプは、高温(~550℃)Na中での使用に耐えられること。
- (c) 要求仕様を表-2に示す。

(4) 放射線遮へい

① 中性子遮へい

- (a) 遅発中性子検出器の下部に炭化ホウ素(B₄C)の遮へい体を配置して、炉心からの中性子を遮へいすることによって遅発中性子検出器位置でのバックグラウンドを下げ、Naにより運ばれるDN先行核からの遅発中性子を検出する能力を確保する。

② 炉上部生体遮へい

- (a) 遮へい設計基準に定める遮へい区分を確保するため、装置上部に生体遮へい体を設ける。
- (b) 中性子の遮へいについては、①のB₄C遮へい体を考慮する。
- (c) 遮へい区分および設計線量当量率は、次のとおり。

- ・原子炉運転中：C区域相当(線量当量率320 μSv/hr以下)
- ・原子炉停止1時間後：A区域(線量当量率20 μSv/hr以下)

なお、設計の目標は上記の1/10とする。ただし、ストリーミングについては、上記の100倍以内とする。

(5) 回転プラグとの断熱構造

- ① 本装置は、回転プラグ下面より高い位置まで高温のNaを取り込むことから、回転プラグ本体に熱的な影響を与えないように断熱機構を設ける。

② 原子炉定格運転中の断熱機構の制約条件は、次のとおり。

- (a) 回転プラグ上面で60℃以下。
- (b) 回転プラグ上部から窒素ガス冷却層下面まで130℃を越えないこと。
- (c) 回転プラグのフリースメタルがメルトしないこと。

(6) 試験用燃料体との着脱機構

- ① 試験用燃料体との接続状態時や着脱時において、試験用燃料体に過大な荷重が加わらない構造とする。
- ② 試験用燃料体と切り離れた状態においては、回転プラグの運転に支障の無いように十分着脱機構を引き上げられる構造とする。

(7) 試験用燃料体

試験用燃料体は、B型特殊燃料集合体を想定した設計とする。

(8) 設計温度、圧力条件(通常運転時)

① 設計温度

- ・ Na接液部：550℃
- ・ 回転プラグ上面：150℃

② 設計圧力

(a) 第一種管部

- ・ 内 圧：500 kPa(電磁ポンプ吐出圧力に余裕を見る)
- ・ 外 圧：98 kPa(バックアップシールガス圧力に余裕を見る)

(b) 第三種管部

- ・ 内 圧：98 kPa(バックアップシールガス圧力に余裕を見る)
- ・ 外 圧：98 kPa(装置内真空引き時)

(9) 耐震条件、機器種別

① 耐震条件⁹⁾

(a) 耐震クラス

- ・ A (S1)クラス

(b) 耐震評価

- ・ 耐震の評価は、動的、静的の何れかの厳しい値を用いる。この時の静的評価には、以下の加速度を用いる。

- ・ 水平加速度：0.741 G

・鉛直加速度：0.36 G

② 機器種別

- ・装置本体上部のNa流路部：第1種管
- ・原子炉カバーガスバウンダリ部：第3種管
- ・駆動部：第3種管
- ・その他の炉内構造部：第1種機器相当

(10) 漏洩検出

DNDを設置するドライウエル内には、Naの漏洩検出器を配置する。

(11) 寸法取り合い条件

① 設置位置

- ・制御棒予備孔(炉心第3列)

② 装置の主要寸法

- (a) 外 径： ϕ 150 mm
- (b) 据付フランジ：六角対辺間距離190 mm
- (c) 軸方向取り合いレベル
 - ・炉心上部機構上面：GL-3,136 mm
 - ・炉心上部機構下端：GL-9,460 mm
 - ・炉内Naレベル：GL-6,100 mm

③ 試験用燃料体との取り合い

- ・燃料体頂部レベル：GL- 9,490 mm
- ・炉心中心レベル：GL-10,860 mm
- ・燃料体ハンドリングヘッド内径： ϕ 56 mm
- ・燃料体六角対辺間距離：78.5 mm(パッド部を除く)
- ・燃料体全長：2,970 mm

(12) 設計寿命

- ・装置本体の設計寿命：5年(目標10年)

(13) 装置本体の取扱

① 装置本体の取扱(据付、撤去)時は、既設の取扱機を用いる。

- (a) 原子炉への据付は、特性試験装置取扱機を用いる。
- (b) 原子炉からの撤去は、上部案内管取扱機を用いる。

4.3 機能および構造の設計検討

4.3.1 プロセス検出機構

(1) 遅発中性子検出

遅発中性子検出器(DND)は、炉心からの中性子の影響を最小限度に押さえるため、装置本体の中性子遮へい体の上側に配置している。遅発中性子の検出能力は、DND本体の感度の他に、検出位置においてDN先行核から放出される遅発中性子の数(シグナル成分)と炉心から到達する中性子数(バックグラウンド成分)の比、つまりS/N比により左右される。また、DND本体の感度は、検出器の大きさに左右されるが、装置に組み込む場合は寸法上の制約も無視できない。さらに、本装置の場合、限られた設置スペースでDN先行核を運ぶNa流路を確保し、Naの熱を回転プラグに極力伝えないような断熱機構を採用する必要がある。これらを加味すると、DNDの設置スペースは自ずと限られてくるが、ここでは、現状で入手が可能な耐高温型の中性子検出器(外径:38mm,長さ:550mm,感度:0.3cps/nv)を想定して、遅発中性子の検出感度や検出機構を検討し、今後必要なR&D項目を抽出した。

① 遅発中性子の検出感度

遅発中性子の感度評価は、燃料破損時に試験用燃料体から放出されるDN先行核(表-3参照)からのシグナル成分の中性子束と、炉心からDNDに到達するバックグラウンド成分の中性子束を求め、それぞれの値に基づいてDND位置での検出感度(S/N比)とDNDの応答を評価した。ここで、試験用燃料体には、B型特殊燃料集合体の試験体番号B3(以下、「試験用燃料体B3」という)を用いることとした。

シグナル成分の中性子束は、単位線源強度当たりのDND表面等価熱中性子束と冷却材中のDN先行核による中性子放出濃度を求め、それぞれの結果から、DN先行核からの遅発中性子によるDND表面等価熱中性子束(表-4参照)を評価した。なお、冷却材中のDN先行核による中性子放出濃度は次式により求める。

$$A(N,t) = \int \phi(E) \cdot \Sigma_f(E) dE \cdot \frac{\lambda_N \cdot FL^G \cdot LN \cdot \nu_N \cdot \mu_N \cdot \delta}{Q} \cdot e^{-\lambda_N t} \quad (1)$$

ここで、 $A(N,t)$: 冷却材中のDN先行核Nによる時間tの中性子放出濃度 (1/g・sec)

λ_N : 核種Nの崩壊常数 (1/sec)

FL^G : 破損孔の幾何学的表面 (cm²)

LN : 核種Nのリコイルレンジ (cm)

ν_N : 核種Nのcumulative yield

μ_N : 核種Nの遅発中性子放出割合

δ : リコイルによる escape coefficient

Q : 冷却材流量 (g/sec)

t : 破損燃料の放出点から検出点までの移行時間 (sec)

Σ_f : 破損燃料の核分裂断面積 (cm^{-1})

$\phi(E)$: 破損燃料中の中性子束 ($n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

(1) 式において、冷却材流量 Q および放出点から検出点までの移行時間 t は、本装置の設計により決定される因子である。評価計算に用いた冷却材流量のパラメータは次のケースとし、それ以上の冷却材流量については外挿して評価した。

・冷却材流量のパラメータ

・ケース1/2/3/4/5=2.8/2.3/1.8/1.3/1.0 (kg/sec)

また、バックグランド成分の中性子束は、DNDの軸方向B₄C遮へい長さをパラメータとして評価した。DNDの軸方向位置のパラメータを以下に示す。

・モデルA : 回転プラグ下面から1mのB₄C遮へい体を配置 (図-2参照)

・モデルB : 回転プラグ下面から1.5mのB₄C遮へい体を配置 (図-2参照)

評価の結果、評価パラメータで最も悪いモデルBとケース1の組合せの場合で、S/N比約12、DN計数率120cps程度が得られ、さらに外挿による評価として、B型特殊燃料集合体の最大冷却材流量約4kg/secの場合でもS/N比が7程度、DN計数率で73cps程度が得られることがわかり、いずれも中性子検出システムとして成立することを確認した。なお、モデルBの遮へいでDND位置のS/N比を10以上確保する場合、冷却材流量は3.1kg/secが上限で、この時のDN計数率は110cps程度が見込まれる。

上記の結果から、本装置の中性子遮へい体には、長さ約1,000mmのB₄C遮へいを採用することとした。

検出感度等の解析結果として、信号成分の中性子束、バックグランド成分中性子束、DND位置のS/N比およびDNDの計数率をそれぞれ表-4--5に示す。

② R&D項目の摘出

検出感度の評価においては、市販の中性子検出器を想定して検討を行ったが、構造設計側から見ると、より小型で外径20mm、長さ400mm程度の中性子検出器が望まれ

ており、このため小型の検出器の開発が必要となる。中性子検出器の小型化は、検出感度の低下を伴うことから、検出性能を確保するための感度を定めて行う必要がある。この時の目標の感度としては、①の評価に用いた中性子検出器の1/3の感度とした。これは、1/3の感度としても、冷却材流量約4kg/sec時にDN計数率が24cps程度(DND位置のS/N比7)見込まれることによる。

③ 中性子検出器の基本構造

中性子検出器は、回転プラグ下面から1mの中性子遮へい体の上部のドライウエル内に配置し、外径~20mm,長さ~400mm,検出感度0.1cps/nv以上の検出器とする。

(2) Na流量の検出

① Na流量計の検討

Na用の電磁流量計(EMF: Electromagnetic Flowmeter)には、磁界発生方式の違いにより、永久磁石式と励磁コイル式とに分類される。永久磁石式は、励磁コイル式に比べて構造が簡単であり小型化が図れるという特徴を持っている。本装置用のEMFとしては、前述の利点と計測線数が少なくケーブルの貫通処理が低減されるなどの利点から、永久磁石式を採用することとして仕様等の検討を行った。

EMFに用いる磁石材については、キュリー温度が高い磁石であること、高温時の磁束低下率(可逆的温度係数や不可逆減磁率)が小さいこと、磁気エネルギー積が大きい(強力な磁石)こと等が条件となる。これらの条件と、「常陽」の計測線付集合体でのEMFの使用実績⁶⁾(表-8、図-3参照)、海外炉での照射データ⁶⁾を参考に、EMF用の磁石を検討した結果、希土類系のSm₂Co₁₇型磁石が最も有望なものと判断している。ちなみに、装置の設計寿命(5年)中にEMFが受ける全中性子の照射量は 2×10^{19} (n/m²)程度である。

次にEMFの出力信号について、出力感度0.4mV/m/secを設計目標にして流動管中心部の磁束密度を評価すると、常温で約370 Gauss程度あれば良いことがわかり、使用実績のあるSm₂Co₁₇型磁石で十分に達成可能と判断された。しかし、高温雰囲気での長時間の使用による減磁のデータについては、新たに取得する必要がある。なお、流動管中心部の磁束密度評価は、EMFの出力信号を評価する次の式を用いた。

$$E = v \cdot B_0 \cdot D \cdot K_T \quad (2)$$

ここで、 E : EMFの出力信号 (mV)

v : 流体の平均流速 (m/sec)

B_0 : 流動管中心部の磁束密度 (G)

D : 流動管内径 (m)

K_T : 補正係数 (0.55と推定)

② R&D項目の抽出

希土類系の $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型磁石は、比較的容易に入手することができるが、高温域での減磁データや照射データが極めて少ない。このため以下のR&Dを考慮する。

(a) 高温ガス (~550°C) 中で、磁束変化等のデータを得て、温度による減磁の割合を明らかにする。

(b) 磁石の照射試験を行い、照射による磁束変化等のデータを得て、減磁の割合を明らかにする。目標照射量は、装置の寿命中に磁石 (EMFの位置はGL約-5700mm) が受ける以下の照射量を目標とする。

・ 全中性子照射量 : 2×10^{19} (n/m²)

・ 熱中性子照射量 : 1.4×10^{19} (n/m²) ($E \leq 0.41\text{eV}$)

(c) 実機仕様流量計による高温Na中での特性、耐久性の把握。

③ EMFの基本構造

磁石は温度や放射線等の要因により保持力が劣化することを考え、可能な限り大きくしたほうが有利であるが、装置運用上の制約も考慮する必要がある。これらを含めて検討し、図-4に示す流量計を設定した。

4.3.2 流量調節機構

装置内Na流量の調節には、機械的に流路断面積を変化させて流量を調節する機械式流量調節機構⁹⁾と、Na流路にアニューラー型電磁ポンプ (A-LIP) を配置して流量を調節する電磁ポンプ式流量調節機構が考えられた。前者は、開発の初期に検討されたもので、流量調節範囲が狭いため試験内容が限られてくると構造が複雑になる等の短所がある。一方後者は、前者の改良検討の中で考案されたもので、流量調節範囲を広く取れることと構造が単純化される等の長所があることから装置の流量調節機構に採用したものである。以下、電磁ポンプ式流量調節機構について記載する。

(1) 電磁ポンプ式流量調節機構の検討

流量調節機構に用いるA-LIPは、Na流路部が円管状であるため構造強度上信頼性が高いという特徴を有しており、流路形状の違いによりセンターリターン式とフロー

ルー式の2種類に分類される。本装置には、前述の2種類の方式から、要求性能(流量、吐出圧力)が確保できることと、配置可能な遅発中性子検出器の大きさから生じる検出精度への影響を考慮し、フロールー式のA-LIPを採用することとし、その開発に着手した。センターリターン式とフロールー式を用いた装置のシステム検討図を図-5に示す。また、両者の比較検討の結果を表-9に示す。

① 電磁ポンプの開発

高温のNa中に浸漬して使用する電磁ポンプは、400℃程度迄の開発が報告¹⁰⁾¹¹⁾されているが、それ以上の温度(~550℃)で使用可能なものは存在しないため、新たに開発する必要があった。電磁ポンプを高温のNa中で使用可能とするためには、予想される温度700℃程度迄コイルの耐熱性(電気絶縁性能)を確保することが必要と判断されたため、コイルの試作に続いて短尺の電磁ポンプの試作試験を行い、電磁ポンプの成立性を確認した。

コイルの試作については、入手が容易なMIケーブルとセラミック絶縁電線を選定し、コイル状に加工したものを不活性ガス雰囲気中で高温に加熱し、絶縁抵抗や素線抵抗等の変化を測定した。試作試験の結果、500℃以上ではMIケーブルが適していることが判った。また、大気中でコイルに目標電流(約10A)を通電すると約740℃の高温となることも確認された。これらの結果から、電磁ポンプとしての信頼性を高めるためにはコイル温度をより下げることと、コイルの耐熱性を向上させる必要があると判断され、これらの解決手法として、コイル部で発生するジュール熱を効率良く外部へ移送する機構(電磁ポンプ内部の空間にMgO粉末を充填し、外部Naへの熱移動を促進)を用いること、コイルに用いているMIケーブルの耐熱性の改善(シース材料をSUS316からNCF600に変更)を行い、電磁ポンプの試作に反映することとした。試作コイルの仕様、試作試験結果を表-10に示す。

次の電磁ポンプの試作は、コイル試作時の課題の解決策を反映させて、実機の1/4短尺モデルと1/2短尺モデルの2段階で試作試験を実施した。表-11に試作した電磁ポンプの仕様を示す。1/4短尺モデルの試作では、電磁ポンプ冷却のための伝熱構造の妥当性を確認することを目的に6コイルの電磁ポンプを試作して気中試験を行った。その結果、ポンプ外部を電気ヒータで加熱するという実機使用時の伝熱形態との違いがあるものの、伝熱解析の結果と併せて評価すると、コイルの最高温度を750℃以内に押さえられる見通しを得た。図-6~8に1/4短尺電磁ポンプ試作試験の結果を示す。

1/2短尺モデルの試作では、フルスケールの電磁ポンプの妥当性を確認することを目的に12コイルの電磁ポンプを試作し、Na中に浸漬した状態で特性試験を実施した。試験の結果、Na温度530℃において流量300l/min、吐出圧力約100kPaのポンプ性能を得、この時のコイル温度は最高650℃(コイル印加電圧160V)となり、伝熱解析の結果と併せて評価すると、Na温度550℃の実機運転状態でのコイル温度を700℃以下で運転できる見通しが得られた。図-9~11に試作試験の結果を、図-12に試作電磁ポンプの構造を示す。

(2) R&D項目の抽出

一般的な電磁ポンプとしての開発はほぼ終わっているが、装置の流量調節用として原子炉内の中性子場での照射による影響が残された課題である。確認の手段としては、炉上部照射プラグリグ(UPR)を用い、短尺の電磁ポンプもしくはコイル単体の照射試験を行い中性子照射下での絶縁抵抗や素線抵抗の変化を測定し、電磁ポンプの場合はさらに特性の変化を調べ、照射環境下での性能や耐久性等を評価しておく必要がある。なお、中性子照射量は、装置の設計寿命中(5年)に電磁ポンプ(電磁ポンプ下端位置GL約-7800mm)が受ける以下の照射量を目標とする。

- ・全中性子照射量： 1×10^{23} (n/m²)
- ・熱中性子照射量： 3×10^{21} (n/m²) ($E \leq 0.41\text{eV}$)

(3) 電磁ポンプ式流量調節機構の基本構造

電磁ポンプの短尺モデル試作結果から、実機の流量調節機構に用いられる電磁ポンプは、吐出圧力約265kPa(約2.7kg/cm²)、流量300l/minの性能とするため、コイル24個を用い、その寸法は外径約10cm、長さ約1.4mとなる。流量調節機構に用いる電磁ポンプの仕様とその予想性能をそれぞれ表-12、図-13に示す。なお、電磁ポンプ仕様の設定については、4.3.5(2)③電磁ポンプ要求性能の設定を参照願う。

4.3.3 試験用燃料体との着脱機構

(1) 着脱機構の検討

装置には、試験用燃料体に接続して試験用燃料体を冷却したNaを装置内に取り込む機能と、燃料交換時に回転プラグが回転可能なように試験用燃料体と確実に切り離す機能、つまり、試験用燃料体との着脱機能が必要である。試験用燃料体との着脱機能の設計で安全上考慮する必要のある事項は、次のとおりである。

- ① 試験用燃料体と接続した状態において、燃料体に過大な荷重をかけないこと。
- ② 試験用燃料体と切り離れた状態において、本装置の下端は炉心上部機構の整流格子下端より上側に引き上げられていること。

(2) R&D項目の抽出

着脱機構のR&D項目としては、装置本体と試験用燃料集合体との偏芯時を含む着脱試験がある。この試験は、装置本体と試験用燃料集合体の着脱時において許容される偏芯量を確認し、装置設計の詳細化や運用時の制限条件を設定するために行うものである。

(3) 基本構造の検討

上記(1)の事項を反映して、図-14に示す着脱機構¹²⁾とした。着脱機構の動作原理は、インターフェイス部に設けた剛性の異なるコイルバネを連結管の上下にそれぞれ配置し、操作ロッドを押し下げると連結管下部に着座していた接続金具が下部のコイルバネの反力により押し下げられて試験用燃料体のハンドリングヘッドに接続され、操作ロッドを引き上げると上部のコイルバネの反力により連結管を押し上げ、さらに接続金物を連結管により引き上げることによって試験用燃料体と切り離される。着脱時の操作は、装置の上部に配置した電動モータによりプロセス検出機構を駆動し、操作ロッドを上下させることによって行われる。着脱時の駆動ストロークについては、接続金具と試験用燃料体の接続長さ(約15mm)と、炉心部と炉心上部機構との間隙(30mm)を考慮して50mmと設定した。

4.3.4 その他の機構

(1) 炉上部生体遮へい

炉上部での遮へい区分を確保するため、装置本体に必要な遮へい能力を確保する必要がある。装置本体の遮へいにおいて考慮する主な線源としては、Naおよびカバーガスからの γ 線、炉心からの中性子がある。この内、遮へい評価で支配的な線源は、装置内を流れるNaである。これは、Naが回転プラグの下面より高いDNDの位置まで流れるため、DNDより上部で装置本体部に遮へいを施す寸法の制約が加わるために生じている。遮へいの簡易評価の結果、装置上部で設計線量等量率(320 μ Sv/h以下)を満足させるためには、プロセス検出機構のシール部より上部に30cm弱の鉛遮へいが必要であることが判明している。なお、現在の設計ではこの遮へい体を考慮していないため、詳

細な遮へい解析を行いその結果を基に構造を検討する必要がある。検討において、線源となるNa量を制限する必要がある場合は、流量調節範囲や試験用燃料体への影響も検討に加える必要がある。

(2) 回転プラグとの断熱

回転プラグに装荷されている機器類を保護するため、本装置の上部まで高温のNaを流すことにより生ずる熱を遮断するために断熱層を備える。伝熱評価の結果、装置本体の外周部でDND位置とB₄Cの位置にそれぞれ厚さ20mmと10mmの断熱層を設け、さらにプロセス検出機構のDNDの上部にも500mm程度の断熱層を設けることによって、回転プラグ冷却層下面の温度は制限温度130℃に対して105℃となり、さらに回転プラグ上面位置においても制限温度60℃に対して50℃程度となることが確認された。

4.3.5 全体構造の検討

前項までの各機構の結果を基に、装置の圧力損失や流量調節範囲の検討と装置全体の基本的な構造や各部の寸法等を設定する。

(1) 全体の基本構造

本装置は、大別すると、炉内に配置され装置本体を構成する「システム本体」、DNDやEMFを備えた「プロセス検出機構」と回転プラグ上に設置されシステム本体下部のインターフェイス部を上下させ試験用燃料体との着脱動作を行わせるための「駆動部」に分けられる。装置は、全長6,984mm(試験用燃料体と接続時)、原子炉内装荷部分は長さ6,349mmの円筒状で、その上部で回転プラグの上部分は長さ635mmの六角柱の形状である。

システム本体の構造は、回転プラグ内に位置する部分の下側が二重管構造で、その内部に回転プラグ保護のための断熱材、炉心からの中性子を遮へいしてDNDのS/N比を良くするためのB₄C遮へい体が配置されている。回転プラグ下面より下側の部分は単管構造で、Na液面より下側に流量調節用の電磁ポンプやNa流出孔があり、最下部には試験用燃料体と着脱するためのインターフェイス部を備えている。

プロセス検出機構は、DNDと流量計が備えられており、DNDの下側にはB₄Cの中性子遮へい体が、上側には断熱層が設けられている。DND廻りは三重管構造で最内層の管内部にDNDを配置しており、冷却材Naが一層目(最内層)と二層目の管の間を上方向に流れ、その上部に設けた流出孔から二層目と三層目の管の間を下方向に流れ、流量

計の上部でシステム本体内に流れ出るようにしている。このため、プロセス検出機構の一部においては、冷却材とのバウンダリを構成している。

駆動部は、装置の上部で回転プラグの上側に配置されており、カバーガスバウンダリを確保するためのハウジングとその内部に試験用燃料体との着脱用の駆動モータが配置され、駆動軸を介してプロセス検出機構に接続されている。試験用燃料体との着脱は、電動モータの回転を駆動軸を介して上下に駆動してプロセス検出機構とそれに接続したロッドを上下させてインターフェイス部を駆動(ストローク50mm)して行われる。このほか、駆動部はプロセス検出機構から引き出される計測線、電磁ポンプや駆動用電動モータの動力線等を装置の外に引き出す機能もある。

(2) 圧力損失と流量調節範囲の検討

装置本体の圧力損失と流量調節の範囲を検討するとともに、電磁ポンプの要求性能を設定する。

① 装置本体の圧力損失

装置本体の各部圧力損失は、主に以下の式を用いて求めた。

〈拡流圧力損失〉

$$\Delta P_1 = \zeta_1 \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot v_1^2 \quad (3)$$

ここで、 ΔP_1 : 拡流圧力損失 (kg/cm²)

ζ_1 : 拡流圧力損失係数

$$\zeta_1 = \xi \{1 - (A_0/A_1)\}^2$$

$$\xi = 1$$

A_0 : 拡流前の流路断面積 (m²)

A_1 : 拡流後の流路断面積 (m²)

v_1 : 冷却材流速 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

γ : 冷却材比重 (kg/m³)

〈縮流圧力損失〉

$$\Delta P_2 = \zeta_2 \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot v_2^2 \quad (4)$$

ここで、 ΔP_2 : 縮流圧力損失 (kg/cm²)

ζ_2 : 縮流圧力損失係数 (機械工学便覧記載値)

v_2 : 冷却材流速 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

γ : 冷却材比重 (kg/m³)

〈摩擦圧力損失〉

$$\Delta P_3 = \lambda_3 \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{l}{d} \cdot v_3^2 \quad (5)$$

ここで、 ΔP_3 : 摩擦圧力損失 (kg/cm²)

λ_3 : 摩擦圧力損失係数

$$\lambda_3 = 0.3164 / Re^{0.25}$$

$$Re (\text{レイノルズ数}) = v \cdot d / \nu$$

v_3 : 冷却材流速 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

γ : 冷却材比重 (kg/m³)

l : 流路の有効長さ (m)

d : 流力等価直径 (m)

ν : 冷却材動粘性係数 (m²/sec)

〈二重管摩擦圧力損失〉

$$\Delta P_4 = \lambda_m \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{l}{d_m} \cdot v^2 \quad (6)$$

ここで、 ΔP_4 : 二重管摩擦圧力損失 (kg/cm²)

λ_m : 二重管摩擦圧力損失係数

$$\lambda_m = 0.3051 \cdot Re^{0.25} \cdot f$$

$$Re (\text{レイノルズ数}) = v \cdot d_m / \nu$$

$$f = 1.056 + 0.021 \log(\varepsilon - 0.0015)$$

$$\varepsilon = d_2 / d_1$$

d_1 : 外側管の内径 (m)

d_2 : 内側管の外径 (m)

v_1 : 二重管間隙部の冷却材流速 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

γ : 冷却材比重 (kg/m³)

l : 流路の有効長さ (m)

d_m : 流体平均深さ (m)

ν : 冷却材動粘性係数 (m²/sec)

なお、分岐圧力損失、合流圧力損失および曲がり圧力損失の各圧力損失係数については、機械工学便覧記載値を用いた。

上記評価式に基づく各部圧力損失の評価結果を表-13に示す。同表より、本装置の圧力損失は、流量300l/min時に249kPa(約2.54kg/cm²)となった。また、評価部位で圧力損失が最も大きい箇所は電磁流量計部で、装置圧力損失の約6割を占めていることがわかる。なお、装置の詳細化にあたっては、水流動試験を行って圧力損失データを得る必要がある。

② 流量調節範囲の検討

装置と試験用燃料体B3の圧力損失から、流量調節範囲を検討する。

試験装置、試験用燃料体B3の圧力損失算出式は、次のとおり。

・試験装置の圧力損失

$$\Delta P_s = 1.48 \times 10^2 \times Q_s^2 \quad (7)$$

ここで、 ΔP_s : 装置圧力損失 (Pa)

Q_s : 装置内流量 (g/sec)

・試験用燃料体B3の圧力損失

$$\Delta P_{B3} = 2.45 \times 10^2 \times Q_{B3}^{1.97} \quad (8)$$

ここで、 ΔP_{B3} : 試験用燃料体B3の圧力損失 (Pa)

Q_{B3} : 試験用燃料体B3の流量 (g/sec)

検討結果として、試験用燃料体B3を用いた場合の流量の調節範囲を図-16に示す。図-15の①②③の各点は流量の調節範囲を示している。ここで①点は、冷却材流量が定格で、この時の装置圧力損失分はA-LIPの吐出圧力により保証される。次に②点は、A-LIP停止時の冷却材流量で、定格の約75%まで減少することになる。さらに③点は、A-LIPをブレーキ作用とした場合の最も少ない冷却材流量で、①点の約40%程度まで

減少させることができる。

③ 電磁ポンプ要求性能の設定

電磁ポンプの性能は、試験用燃料体を接続した状態において、装置本体の圧力損失分を保証して、試験用燃料体の定格流量をカバーすることが必要となる。電磁ポンプ要求性能については、①②の結果を基に次のように設定した。

- ・吐出圧力：約265 kPa(約2.7 kg/cm²)
- ・流 量：300 l/min

詳細な仕様等については、表-12、図-13参照。

なお、装置設計においては、試験用燃料体B3をベースに検討してきたが、上記のような電磁ポンプの性能が設定されたことによって、ポンプの性能範囲内であればその他の特殊燃料集合体を用いることも可能となる。

(3) 各機構の構造寸法の検討

ここまでの検討結果や各取り合い条件等を反映して、各部の寸法を設定する。さらに、装置本体の全体組立構造図を図-16に示す。

① システム本体

(a) システム本体部

- ・長 さ：6,459 mm(固定フランジを含む)
- ・外 径：シール部; ϕ 152 mm
：本体胴部; ϕ 150 mm
：固定フランジ六角対辺間; 190 mm
- ・内 径：DND設置位置; 約 ϕ 80 mm
：Na接液部; 約 ϕ 140 mm
- ・主要構造材：SUS304

(b) 中性子遮へい

- ・長さ(厚さ)：1,000 mm
- ・遮へい材：B₄C

(c) 断熱材

- ・長 さ：約2,000 mm(上下各1,000 mm)
- ・厚 さ：上側(DND設置位置); 約20 mm
：下側(B₄C設置位置); 約10 mm

- ・断熱材：マイクサ-ム ($\lambda \approx 0.02 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, $C_p \approx 0.25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, $\gamma \approx 330 \text{ kg/m}^3$)

(d) 流量調節用電磁ポンプ (A-LIP)

- ・外径：約 $\phi 100 \text{ mm}$
- ・流動管内径： $\phi 46 \text{ mm}$
- ・長さ：約 $1,400 \text{ mm}$
- ・コイル数：24コイル
- ・コイル巻数：170ターン/コイル
- ・主要構造材：SUS304

(e) インターフェイス部

- ・先端部外径： $\phi 56 \text{ mm}$
- ・ストローク長さ：50 mm
- ・主要構造材：SUS304. SUS316. NCF750

② プロセス検出機構

- ・長さ：約 $3,000 \text{ mm}$
- ・外径：DNDおよびB4C設置位置 $\phi 77 \text{ mm}$
：ガスシール部 $\phi 80 \text{ mm}$
- ・ドライウェル径： $\phi 22 \text{ mm}^{\text{ID}} \times \phi 27 \text{ mm}^{\text{OD}}$
- ・DND寸法： $\phi 20 \text{ mm}^{\text{OD}} \times 390 \text{ mm}^{\text{L}}$
- ・EMF寸法： $\phi 20 \text{ mm}^{\text{ID}} \times \phi 43 \text{ mm}^{\text{OD}} \times 100 \text{ mm}^{\text{L}}$
- ・中性子遮へい体 (B4C) 長さ：1,000 mm
- ・断熱層長さ：約 500 mm
- ・主要構造材：SUS304

③ 駆動部

- ・高さ：525 mm
- ・外径：六角対辺距離; 190 mm
- ・駆動ストローク：50 mm
- ・主要構造材：SUS304, 炭素鋼

4.4 試験用燃料の検討

FLORAによる燃料の破損限界試験は、試験用燃料体B3を用いることを想定して検討を

行っている。ここでは、試験用燃料体B3の構造について簡単に紹介し、「常陽」での照射試験データや流量調節範囲の検討結果から、破損限界試験の成立性を評価する。なお、4.3.4(2)③電磁ポンプ要求性能の設定でも述べたように、流量調節用のA-LIPの性能の範囲内であれば試験用燃料体B3以外の燃料体を用いた試験も可能となる。このため、利用可能な「常陽」の燃料体を抽出した。

(1) 試験用燃料体B3の構造

試験用燃料体B3は、図-17に示すように、特殊燃料要素を装填したコンパートメント6本を集合体に収納したものであり、コンパートメント毎に仕様の異なる燃料要素が装填可能なことから一体の集合体で複数の条件を与えた試験ができる他、照射後試験施設において検査の後に再組立が可能である等の特徴を有している。また、試験用燃料体B3の冷却材は、下部のエントランスノズルから集合体内に取り込まれ、軸心管下部の流量配分機構を介してコンパートメントとそれ以外に配分される。燃料が装填されているコンパートメントの下部には、流量制御のためのオリフィスが取り付けられており、照射温度条件によってその径を設定するようにしている。

(2) 試験用燃料体B3を用いた破損限界試験の成立性の検討

① 試験用燃料体B3の照射データ

検討に用いた試験用燃料体B3の照射データ(実績)は、被覆管温度が最も高い燃料ピンのデータを用いた。

- ・被覆管最高温度：635℃(被覆管肉厚中心温度)
- ・線出力：327w/cm(軸方向平均)
- ・冷却材流量
 - ・集合体：4.02kg/sec
 - ・コンパートメント：1.8kg/sec(0.3kg/sec×6本)

② 破損限界試験時の成立性

①のデータを基に、破損限界試験時の被覆管の制限温度から、必要冷却材流量を評価し、システムとして成立することを確認する。

必要流量と被覆管温度は、現行との比で、おおむね次の式のように表される。

$$\frac{\text{制限温度に必要な流量}}{\text{現行の最高温度時の流量}} = \frac{(\text{現行の最高温度} - \text{原子炉入口Na温度})}{(\text{制限温度} - \text{原子炉入口Na温度})} \quad (9)$$

ここで、「常陽」特殊燃料要素の被覆管(オーステナイト系ステンレス鋼)の温度を制

限值(700℃)まで上昇させる場合、(9)式から冷却材流量を定格値の約80%に低下させれば良く、図-15に示すA-LIPのポンプ作用により調節可能な範囲にあることからシステムとして成立している。ちなみに、A-LIP停止時の冷却材流量は定格値の約75%に低下し、この時の被覆管温度は720℃程度に上昇する。

(3) その他の燃料体の使用について

破損限界試験時の試験用燃料体については、装置内流量調節用のA-LIPの性能の範囲内で流量調節による被覆管温度の制御が可能であれば、特定の燃料体に限定する必要はなくなる。このことは、A-LIPの性能(300l/min)を上限とすると、試験用燃料体B3の他の燃料体についても使用可能であることを示している。「常陽」で照射中または照射を終えた特殊燃料集合体のうち、FLORAでの破損限界試験に使用可能な燃料体としては、B型特殊燃料集合体で7体(試験体番号B2~B4,B6~B9)、C型特殊燃料集合体で4体(試験体番号C2~C4,C6)が該当する。これらの集合体から参考として、B型特殊燃料集合体の試験体番号B8とC型特殊燃料集合体の試験体番号C6の流量調節範囲を、それぞれ図-18,19に示した。各集合体の圧力損失はそれぞれ以下の式を用いた。

(各集合体の圧力損失式)

- ・ B型特殊燃料集合体B8の圧力損失

$$\Delta P_{B8} = 0.1179 \times Q_{B8}^{1.857} \quad (10)$$

ここで、 ΔP_{B8} : B型特殊燃料集合体B8の圧力損失圧(Pa)

Q_{B8} : B型特殊燃料集合体B8の流量(g/sec)

- ・ C型特殊燃料集合体C6の圧力損失

$$\Delta P_{C6} = 5.29 \times 10^{-2} \times Q_{C6}^{1.946} \quad (11)$$

ここで、 ΔP_{C6} : C型特殊燃料集合体C6の圧力損失(Pa)

Q_{C6} : C型特殊燃料集合体C6の流量(g/sec)

図-18,19に検討結果を示す。図-18,19に示すように、A-LIP運転時のシステム定格運転点①とA-LIP停止時のシステム運転点②間の流量調節の範囲は、試験用燃料体B3を使用する場合(図-15参照)に比べると狭くなっていることがわかる。このことは、試験用燃料体B3以外の燃料体を使用する場合、流量調節による燃料被覆管温度の設定をより精度良く行う必要のあることを示している。

4.5 課題の整理

4.3および4.4項で抽出された課題等を整理し、必要なR&D類をまとめる。

4.5.1 装置内の各機構

(1) プロセス検出機構

① 遅発中性子検出器 (DND)

DNDの課題としては、小型高感度の中性子検出器の開発である。これは、装置の構造設計の寸法上の制約から生じているもので、開発の目標としては、使用温度550℃、検出感度0.1cps/nv以上、寸法は外径~20mm長さ~400mmである。

なお、検出感度については、特に重要な項目で、目標感度が達成されない場合は、バックグランド成分中性子束の低減化策や試験条件の変更も必要になってくる。

② 電磁流量計 (EMF)

EMFの課題は、永久磁石材の高温雰囲気での減磁の割合を明らかにすることと、高温雰囲気がかつ中性子照射による減磁の割合を明らかにすることにある。前者については、炉外試験によって、後者については照射試験を行うことによってそれぞれの影響を明らかにする必要がある。

(2) 流量調節機構

装置内の流量を調節するNa浸漬式の電磁ポンプ(アニューラー型電磁ポンプ：A-LIP)については、中性子照射による影響の確認が残された課題である。確認の手段としては、短尺の電磁ポンプもしくはコイル単体の照射試験を行い絶縁抵抗や素線抵抗の変化を測定し、電磁ポンプの場合は特性の変化を調べ照射環境における耐久性等を評価する必要がある。

(3) 試験用燃料体との着脱機構

着脱機構に残された課題は、装置本体と試験用集合体との偏芯時の着脱性能の確認がある。これは、着脱時に許容される偏芯量を確認し装置の詳細設計への反映と運用時の制限条件を設定するために必要なものである。

(4) その他の機構

その他の機構の課題としては、炉上部の生体遮へい機能の確保がある。必要な遮へいについては簡易評価がなされており、この結果を基に遮へい構造を検討し詳細な解析評価を行って行く必要がある。4.3.4項で述べたように、主な線源であるNaの量を制限するような場合、流量調節範囲や試験用燃料体への影響も検討する必要がある。

4.5.2 装置の全体構造

- (1) 今後は、各機構の課題等の対策の成果を反映しつつ、装置の構造の詳細化を図るとともに、各部の詳細な安全性評価を行う必要がある。
- (2) また、破損限界試験時に必要な流量制御精度と、燃料温度の評価を併せて行う必要がある。
- (3) さらに、装置の性能をより確実なものとするため、全体の水流動試験を行い詳細な圧力損失データを得る必要がある。

4.5.3 試験用燃料体

本装置では、破損限界試験に試験用燃料体B3を用いることを前提に検討が行われ、それに合わせた流量調節範囲が設定されており、他の特殊燃料集合体を破損限界試験に使用する場合は、試験用燃料体B3に比べ流量調節幅が狭くなることがわかっている。このため、試験用燃料体B3と異なる試験体を用いる場合は、試験体毎に詳細に評価する必要がある。

表-1 検出機器類の概略仕様

検出器名	仕 様	員 数
遅発中性子 検 出 器 (DND)	<ul style="list-style-type: none"> ・型 式：高温用核分裂計数管 ・感 度：0.1cps/nv以上 ・使用温度：550℃ ・使用雰囲気：Arガス中 	1個
電磁流量計 (EMF)	<ul style="list-style-type: none"> ・型 式：永久磁石式 ・磁 石 材：Sm₂Co₁₇磁石 ・概 略 寸 法：φ43mm^{OD}×100mm^L ・計 測 範 囲：~300 l/min ・使用温度：550℃ 	1個
熱 電 対	<ul style="list-style-type: none"> ・型 式：シース型K熱電対 ・シ ー ス 材：SUS316 ・絶 縁 材：MgO ・計 測 範 囲：0~800℃ 	3本

表-2 流量調節用電磁ポンプの要求仕様

項 目	諸 元
型 式	Na浸漬式アニューラー型電磁ポンプ (A-LIP)
使用温度	550℃(過渡時；650℃)
流 量	300 l/min.
吐出圧力	約265 kPa
許容寸法	Max. φ 120mm ^{OD} ×Max.2000mm ^L

表-3 試験用燃料体からの核種放出量^{*1}

	⁸⁷ Br	⁸⁶ Br	¹³⁷ I
atoms/s	1.01×10 ⁸	9.94×10 ⁷	1.29×10 ⁸
g原子/s	1.67×10 ⁻¹⁶	1.65×10 ⁻¹⁶	2.15×10 ⁻¹⁶

*1:計算条件

- ・燃料組成 ²³⁸U/²³⁵U/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu=59.2/13.0/16.6/6.9/3.3/0.83 (%)
- ・線出力 300w/cm
- ・ノレット外径 5.3mm
- ・破損面積 0.1cm²(燃料ピン本数は1本)
- ・ラフネスファクタ 10

表-4 信号成分の中性子束²($n/cm^2 \cdot s$)

核種	評価ケース					
	case1 (2.8kg/s)	case2 (2.3kg/s)	case3 (1.8kg/s)	case4 (1.3kg/s)	case5 (1.0kg/s)	外挿 (4.02kg/s)
⁸⁷ Br	26.5	31.8	40.0	53.3	67.0	—
⁸⁸ Br	222	259	310	384	438	—
¹³⁷ I	179	212	259	335	399	—
計	428	503	609	772	904	244

*2:遅発中性子によるDND表面での等価熱中性子束

表-5 バックグラウンド成分中性子束³($n/cm^2 \cdot s$)

モデルA	7.2
モデルB	36

*3:ファクター2を考慮

表-6 DND位置のS/N比

モデル	評価ケース					
	case1	case2	case3	case4	case5	外挿
モデルA	59	70	85	107	126	34
モデルB	12	14	17	21	25	7

表-7 DNDの計数率⁴(cps)

項目		評価ケース					
		case1	case2	case3	case4	case5	外挿
シグナル成分計数率		128	151	183	232	271	73
バックグラウンド成分計数率	モデルA	2	2	2	2	2	2
	モデルB	11	11	11	11	11	11

*4:DNDの検出感度0.3cps/nvを用いて算出

表-8 「常陽」照射装置による電磁流量計(EMF)の使用実績

項 目	照 射 装 置 名		
	INTA-1	INTA-S	INTA-2
材 質			
・型 式(信越化学製)	Sm2Co17磁石	←	←
・化学成分(wt%)	Sm:30	←	Sm:24.5
	Co:50	←	Co:54
	Cu: 9	←	Cu: 4
	Fe:11	←	Fe:15
	Mn:0.01	←	Zn:2.5
密 度 ^{*5} (g/cm ³)	8.4	←	8.4
磁気特性 ^{*5}			
・キュリー点(℃)	780	←	820
・残留磁束密度(G)	8900~9800	←	10200~11000
・保持力 :bHc(Oe)	5500~7500	←	8000~10500
・ " :iHc(Oe)	6000~8000	←	9000~14000
・最大I補料 [*] -積(MGOe)	19~23	←	25~29
照射量(n/m ²)			
Total	8.7×10 ²⁵	2.6×10 ²⁶	2.8×10 ²⁴
Fast(E≥0.1MeV)	2.2×10 ²⁵	6.6×10 ²⁵	7.1×10 ²³
磁石温度(℃)	500 ^{*6}	430 ^{*6}	420 ^{*7}

*5 カタログ値.

*6 計算値

*7 測定値

表-9 A-LIPを用いた流量調節機構の比較検討結果

検 討 項 目	ワンスルー型	センターリターン型
ポンプ設置スペース	大(φ12cm ⁰⁰ ×200cm ¹)	小(φ8cm ⁰⁰ ×40cm ¹)
ポンプの要求性能 (265kPa, 300 l/min)	可	不可
DNDの検出精度に 与える影響	小	大 (DND細径化→感度低下) (下部B4C無→B.G信号大)
総 合 評 価	○	×

表-10 試作コイルの仕様と試験結果

項 目	MIケーブル ^{*8}	セラミックス絶縁電線 ^{*9}
芯線材 線径	銅 外径:φ1.6mm	ニッケルクラッド銅 外径:φ1.2mm 芯線径:φ1mm
絶縁材 シース材	MgO SUS316	81%Al ₂ O ₃ +19%SiO ₂ なし
コイル寸法		
・外径	φ71mm	←
・内径	φ46mm	←
・長さ	44mm	←
巻数	163~169	253~259
温度特性 試験結果	800℃まで良好	500℃で導通抵抗低下 (短絡)
高温耐久 試験結果	700/800℃,約400hrの試験 結果(良)(要耐熱性改良)	試験不可
総合評価	○	×

*8:助川電気製MIケーブル

*9:藤倉電線製フジサーモA,絶縁材は焼成後の分析値

表-11 短尺モデル電磁ポンプの試作仕様と実測性能

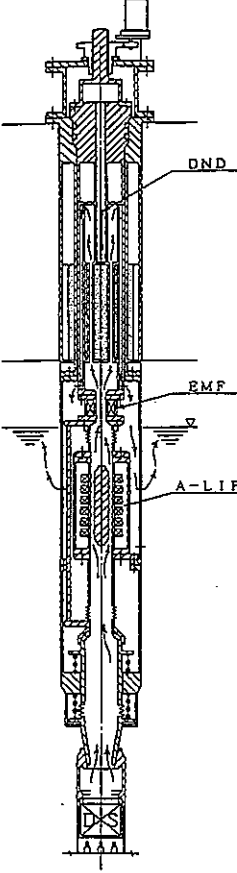
項 目	1/4短尺モデル	1/2短尺モデル
寸 法		
: 全 長	580mm	1200mm
: 外径×内径	φ113.5mm×φ53mm	←
: 外管部長さ	389mm	830mm
: ステータ長さ	334mm	658mm
: ステータ外径	φ105.8mm	←
: ステータ数	12組	←
: コア長さ	340mm	664mm
: コア部外径	φ43mm	←
コイル主要目		
: 員 数	6コイル	12コイル
: 寸 法	φ85mm ^{op} ×φ58mm ^{ip} ×44mm ^l	←
: 巻き数	168巻き/コイル	←
: シース材	NCF600相当	←
: 芯線材	Cu	←
: 芯線径	約φ0.8mm	←
: 絶縁材	MgO	←
: 外 径	φ1.6mm(シース外径)	←
設計温度	550℃	←
ポンプ性能(実測値)	(Na温度;400℃,電圧;140V)	(Na温度;530℃,電圧;160V)
: 流 量	40 l/min.	300 l/min.
: 吐出圧	約55 kPa	約100 kPa

表-12 流量調節用電磁ポンプの概略仕様

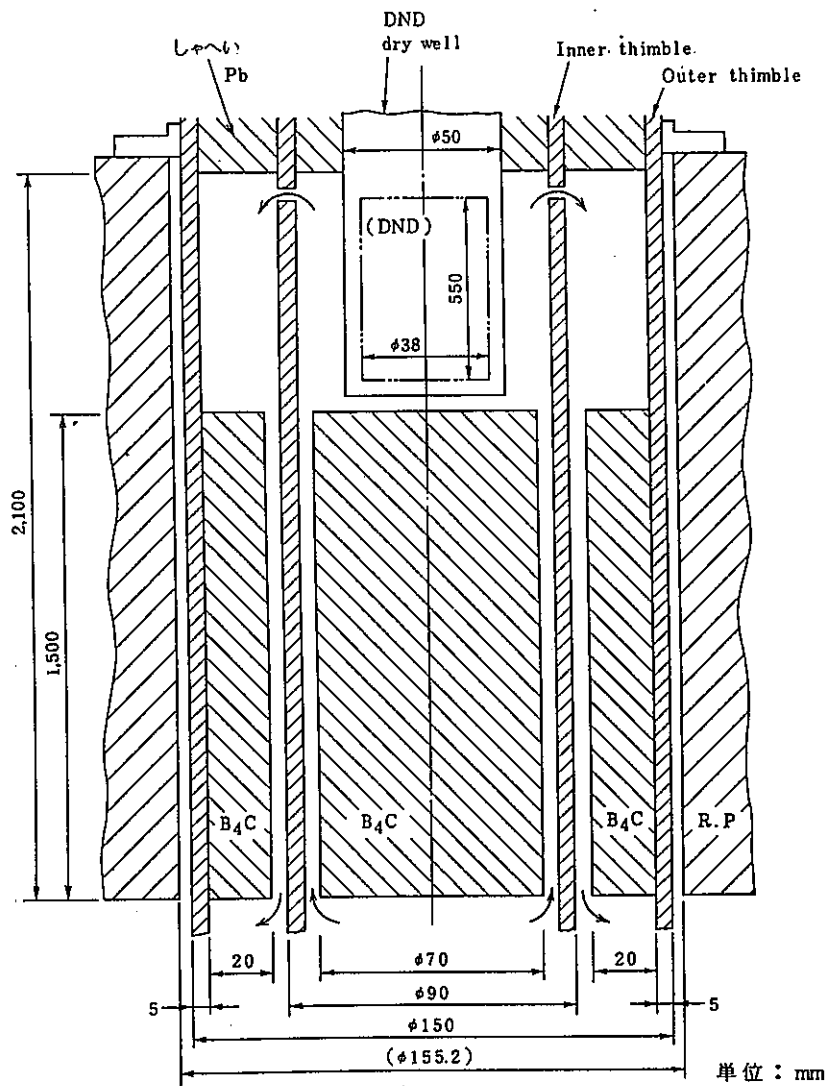
項目	諸元
型式	Na浸漬式アニューラー型電磁ポンプ(A-LIP)
使用温度	550℃(過渡時; 650℃)
流量	300 l/min.
吐出圧力	約265 kPa(電圧; 3φ, 160V)
概略寸法	約φ100mm ^{OD} ×約1400mm ^L
コイル	<ul style="list-style-type: none"> ・数量: 24コイル(MIケーブル) ・材質: シス材; NCF600(外径; φ1.6mm) <li style="padding-left: 20px;">: 絶縁材; MgO <li style="padding-left: 20px;">: 芯線材; Cu(芯線径=φ0.8mm) ・巻数: 約170ターン/コイル
コア芯材	3%ケイ素鋼
ステータ材	ケイ素鋼(12組)
構造部材	SUS304
内部充填材	MgO粉末(コイル外周部に充填)

表-13 装置各部の圧力損失

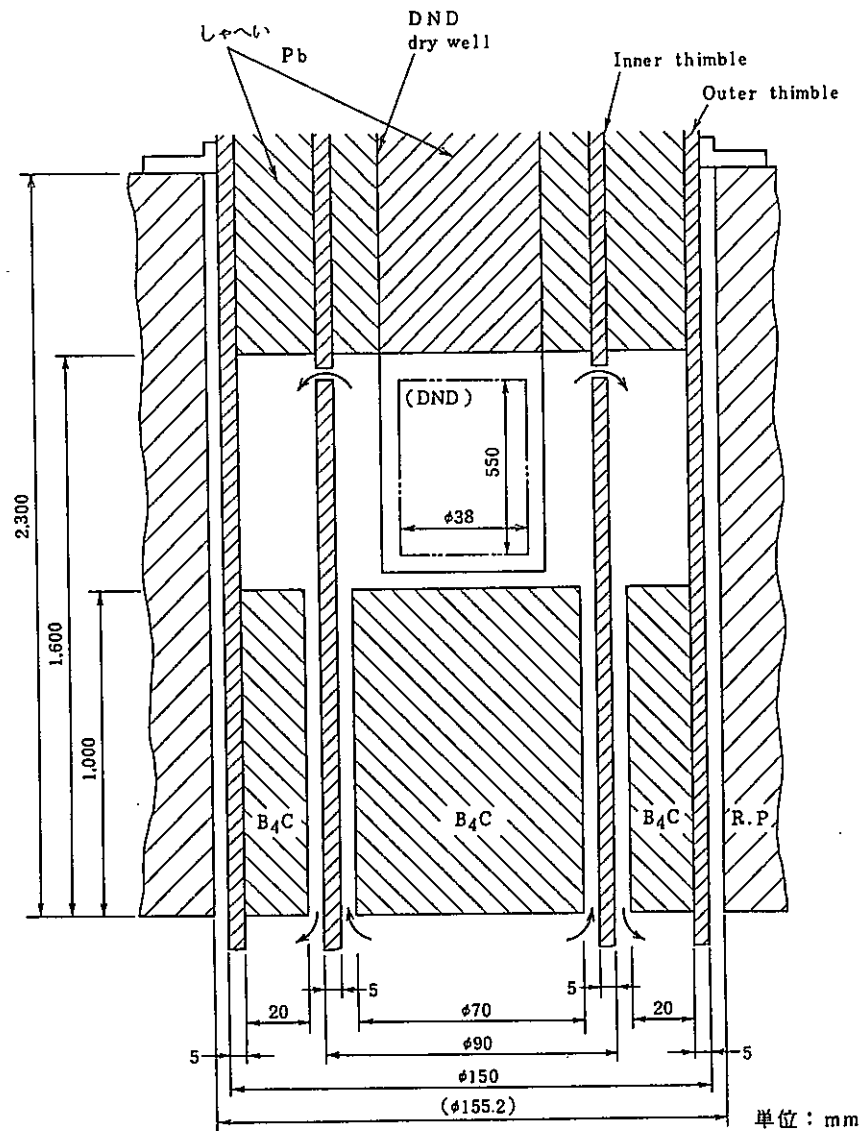
評価部位	流量(l/min)	圧力損失(kPa)	
反転部～システム出口	300	17.36	249
反転部		19.61	
EMF～反転部		44.13	
EMF		152.89	
A-LIP～EMF		0.69	
A-LIP		10.59	
システム入口～A-LIP		3.73	
試験用燃料体B3		300	



*10: $\Delta P_{B3} = 2.45 \times 10^{-2} \times Q^{1.97}$ (Pa) で算出。(流量: Q (g/sec))



計算モデル A



計算モデル B

図-2 DND感度評価計算モデル

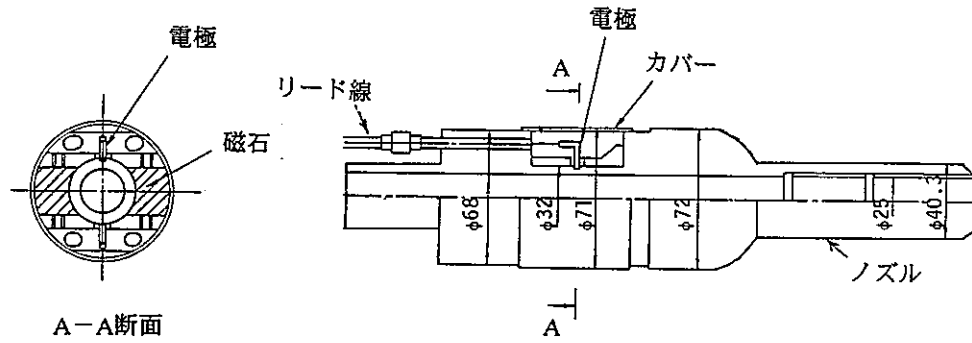


図-3 計測線付集合体用電磁流量計の構造

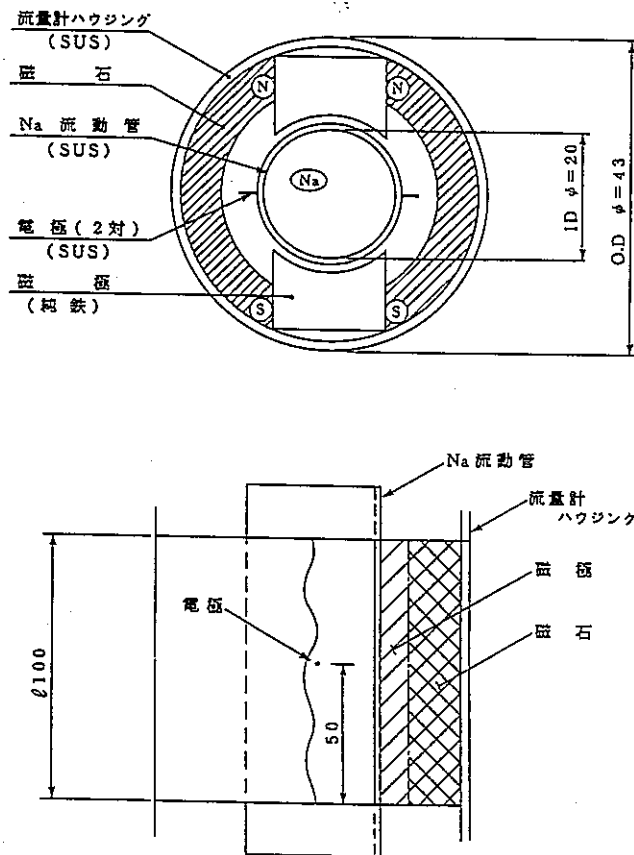


図-4 電磁流量計概略構造図

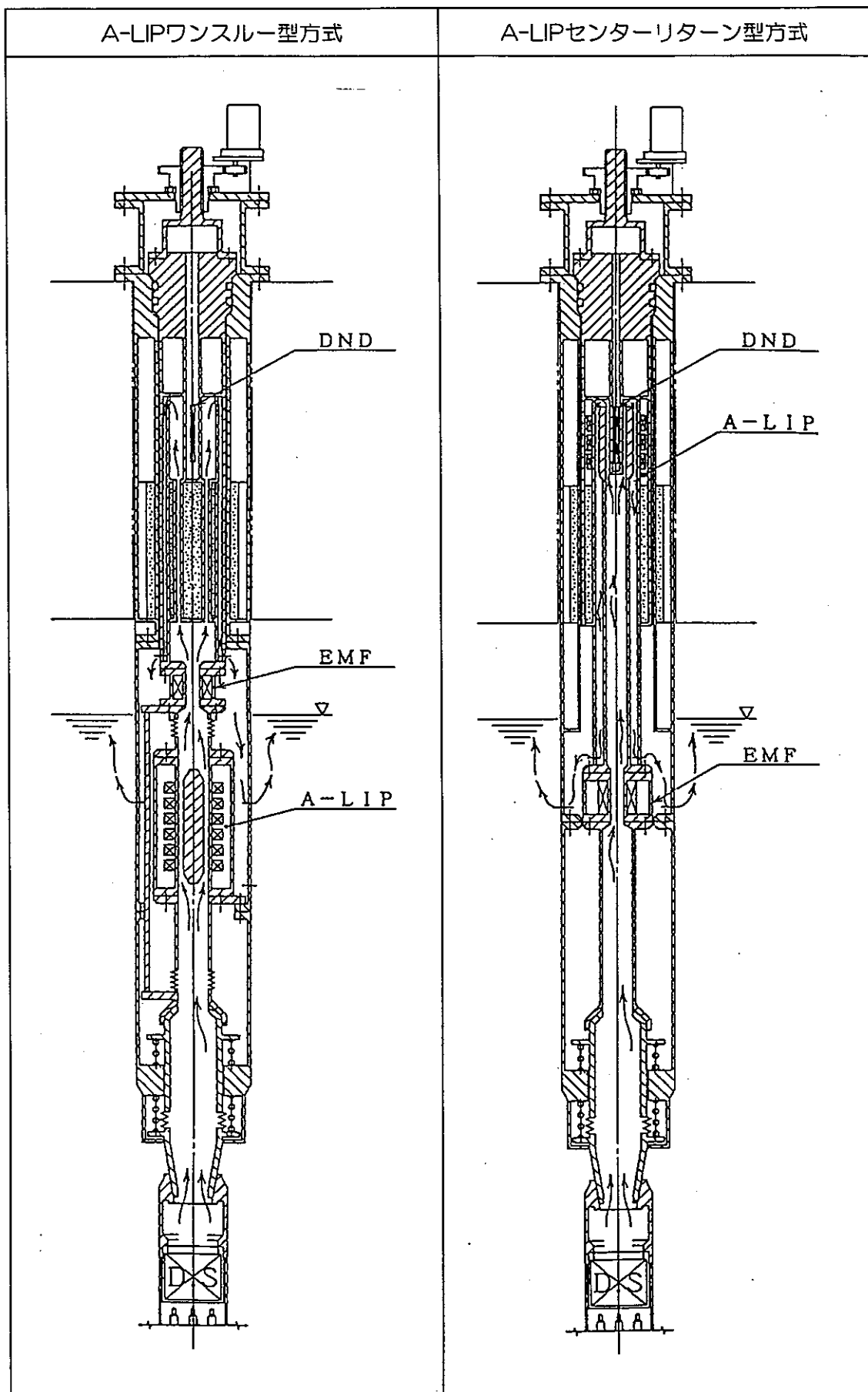


図-5 FLORAのシステム検討図

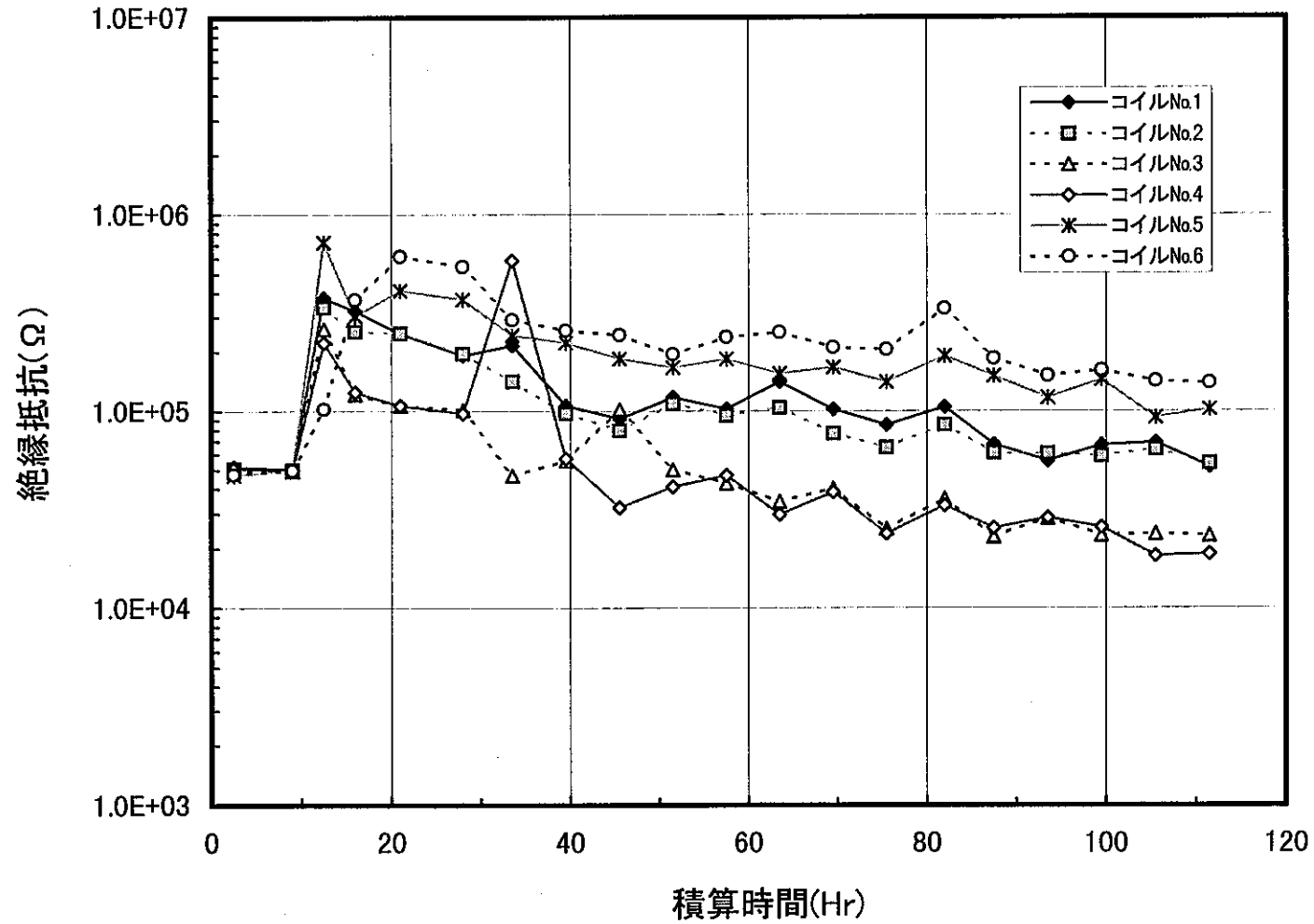


図-6 電磁ポンプ(1/4短尺モデル)絶縁抵抗の推移
(Na温度550°C)

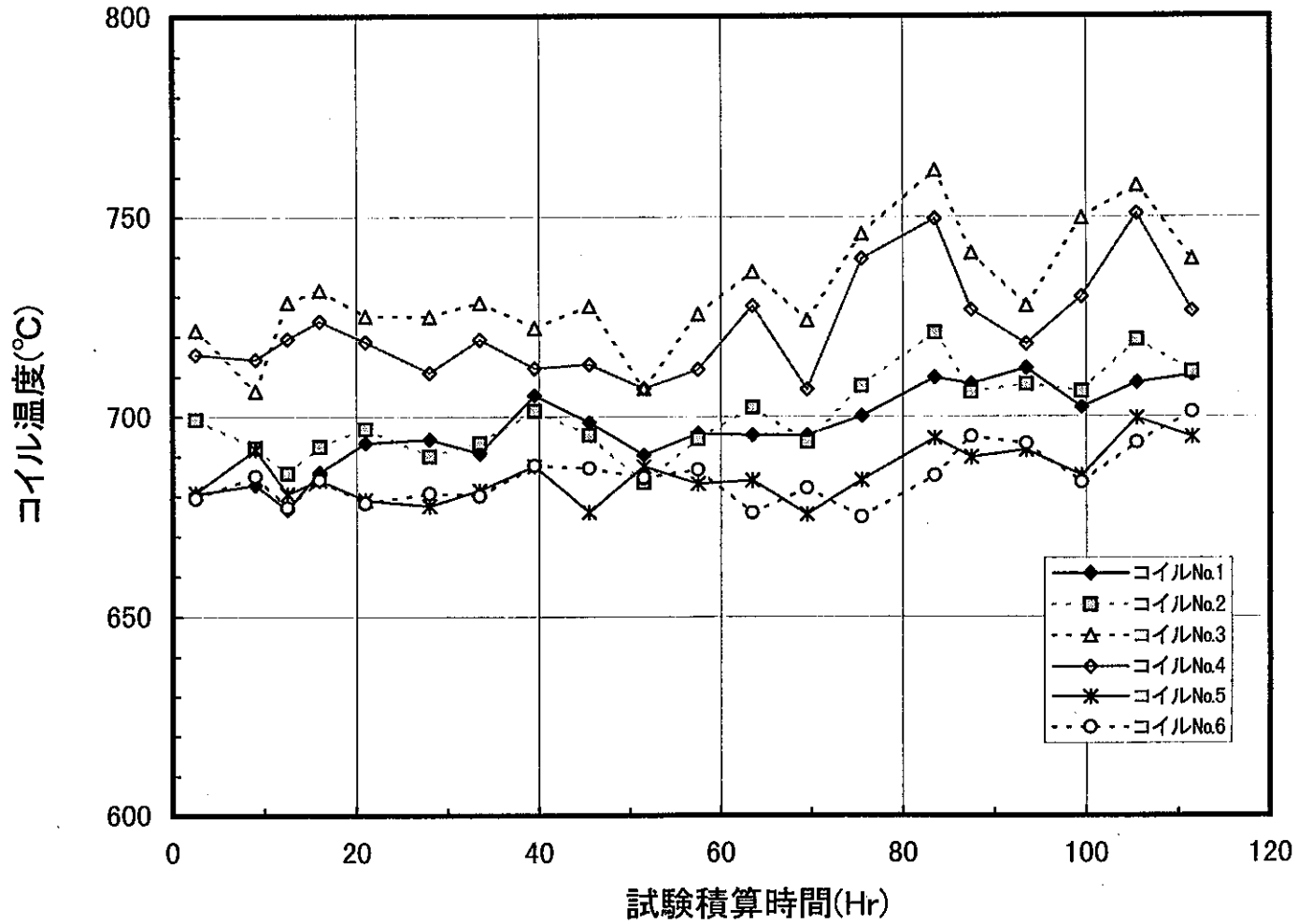


図-7 電磁ポンプ(1/4短尺モデル)コイル温度の推移
(Na温度550°C)

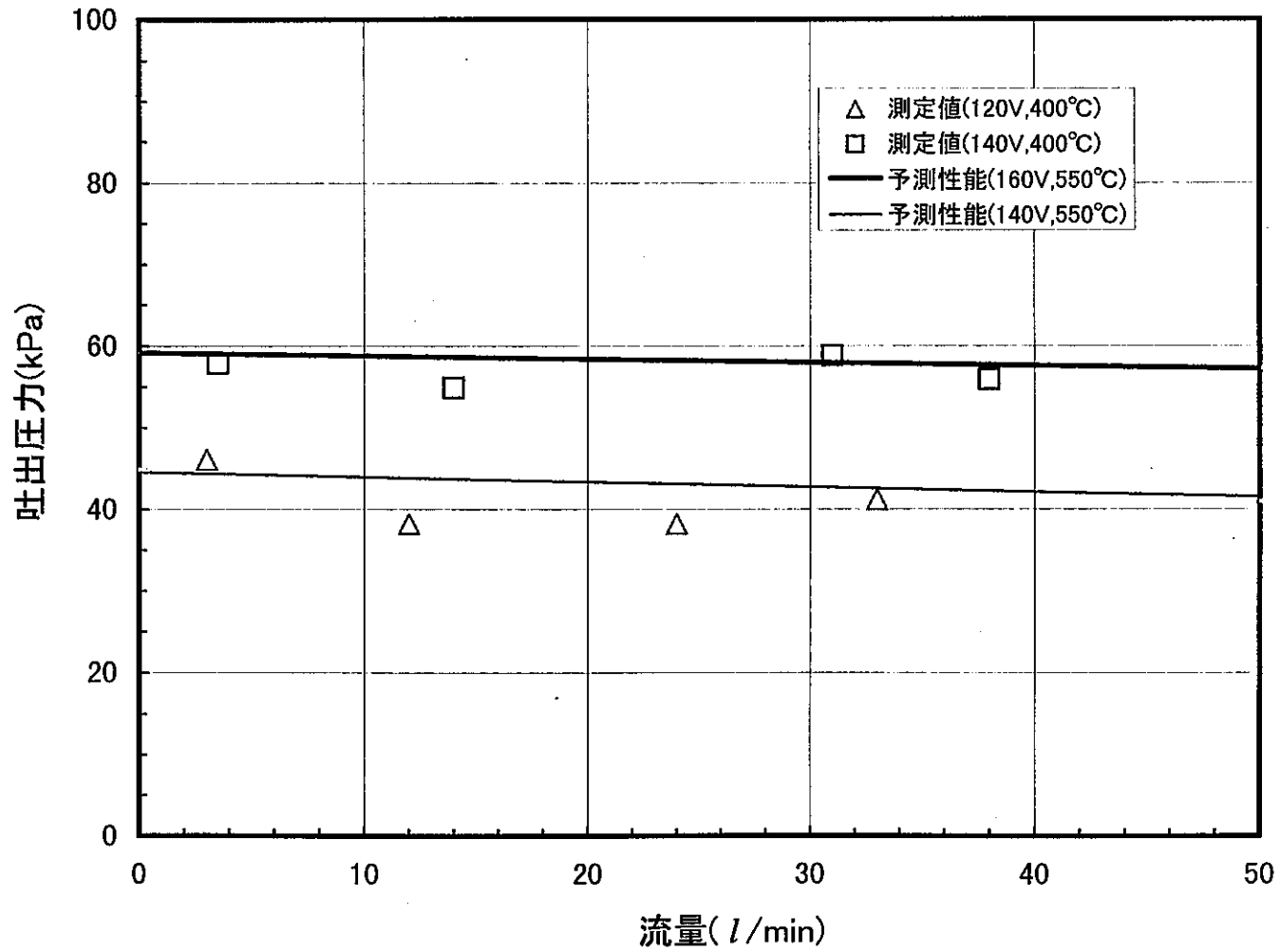


図-8 電磁ポンプ(1/4短尺モデル)の性能

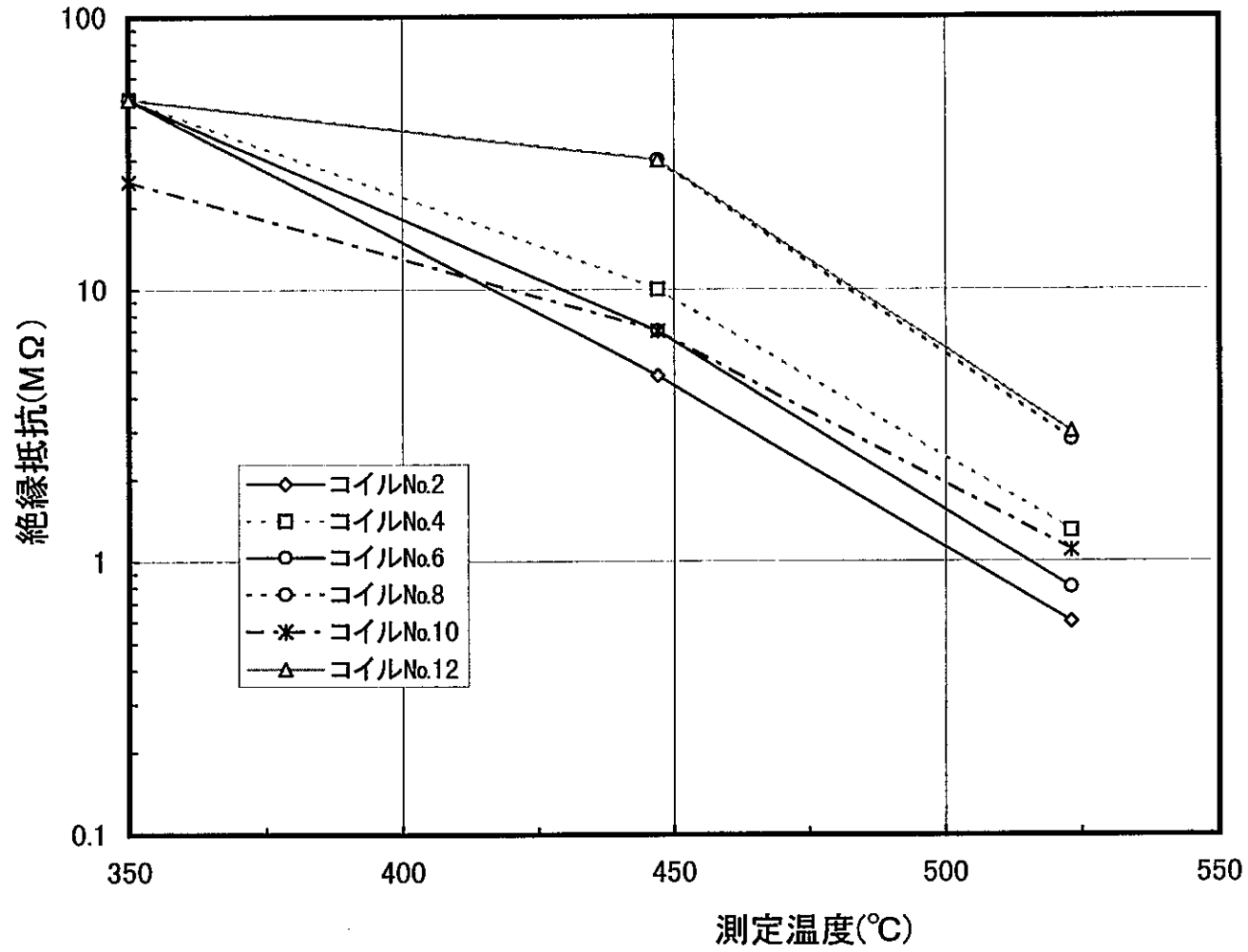


図-9 電磁ポンプ(1/2短尺モデル)コイルの絶縁抵抗

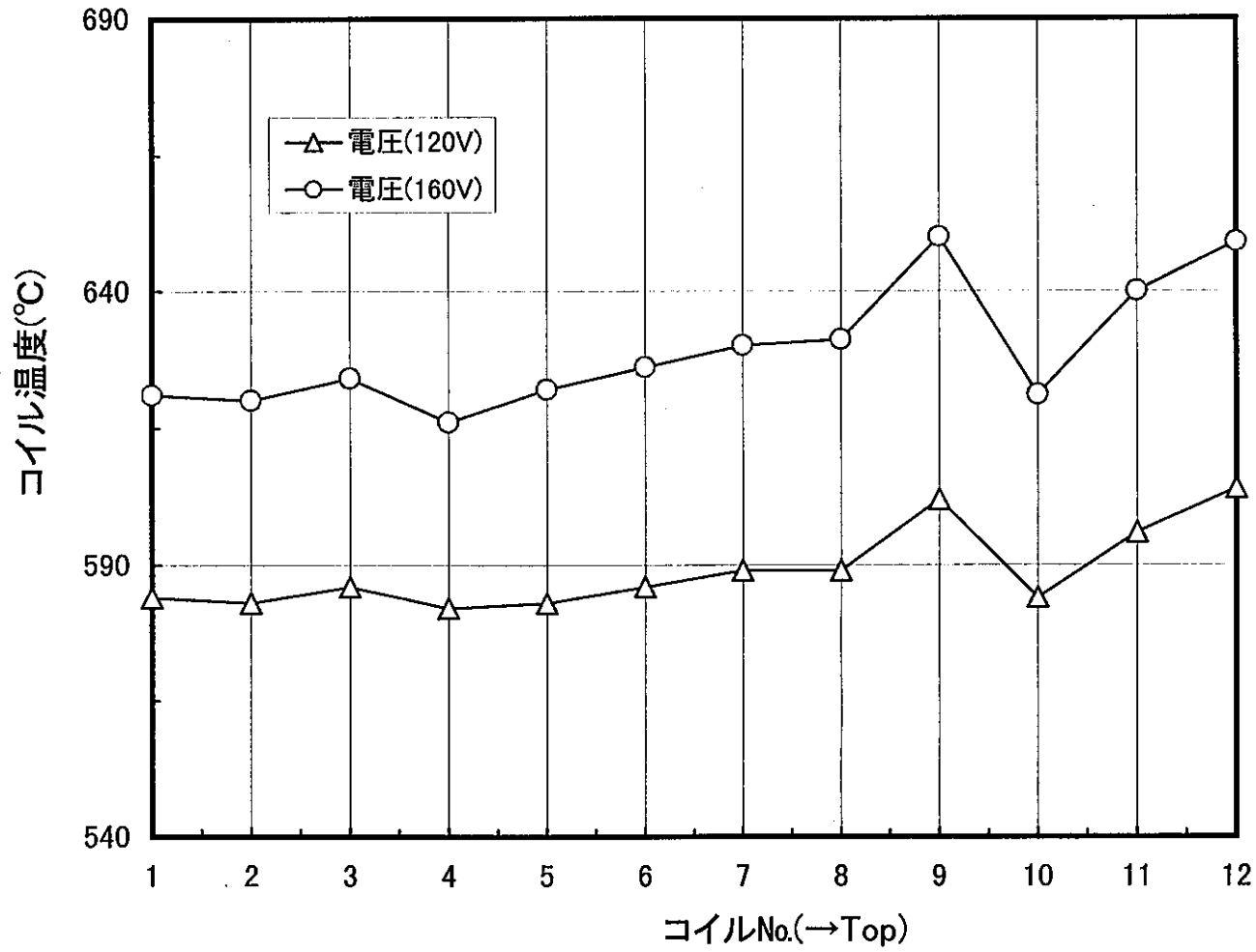


図-10 電磁ポンプ(1/2短尺モデル)コイル温度(Na温度:530°C)

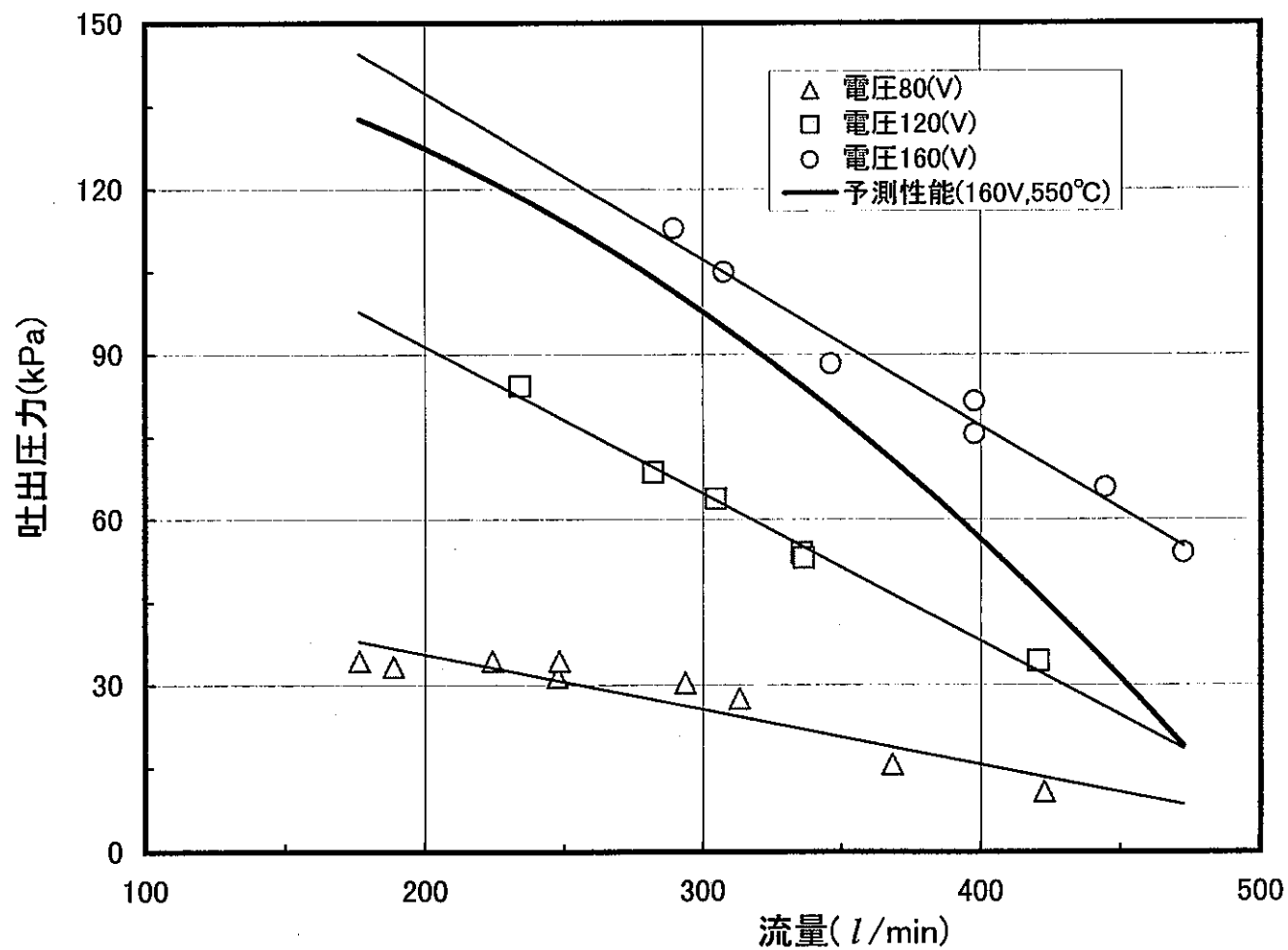
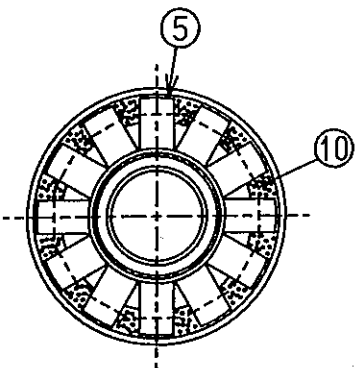
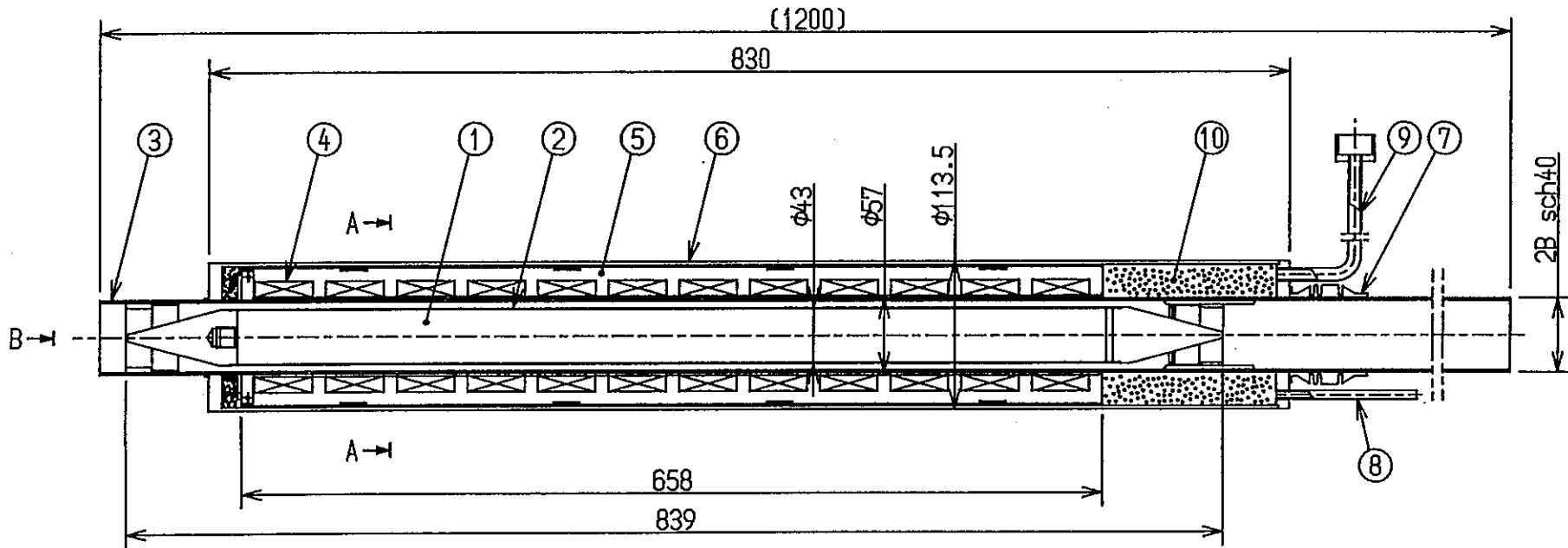
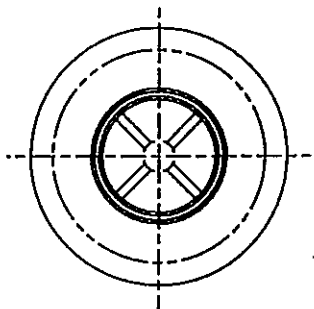


図-11 電磁ポンプ(1/2短尺モデル)の性能(Na温度:530°C)



A-A断面



B矢視

10	充填材	MgO	1式	
9	ケーブル引出ノズル(1)	SUS304TP	6	
8	MgO注入ノズル	SUS304TP	6	
7	ベローズ	SUS304	1式	
6	外管	SUS304TP	1	
5	ステータ部	ケイ素鋼	12組	
4	コイル部	—	12組	
3	ダクト	SUS304TP	1	
2	コア保護管	SUS304TP	1	
1	コア芯	3%ケイ素鋼	1	
品番	品名	材質	数量	備考

図-12 電磁ポンプ(1/2短尺モデル)構造図

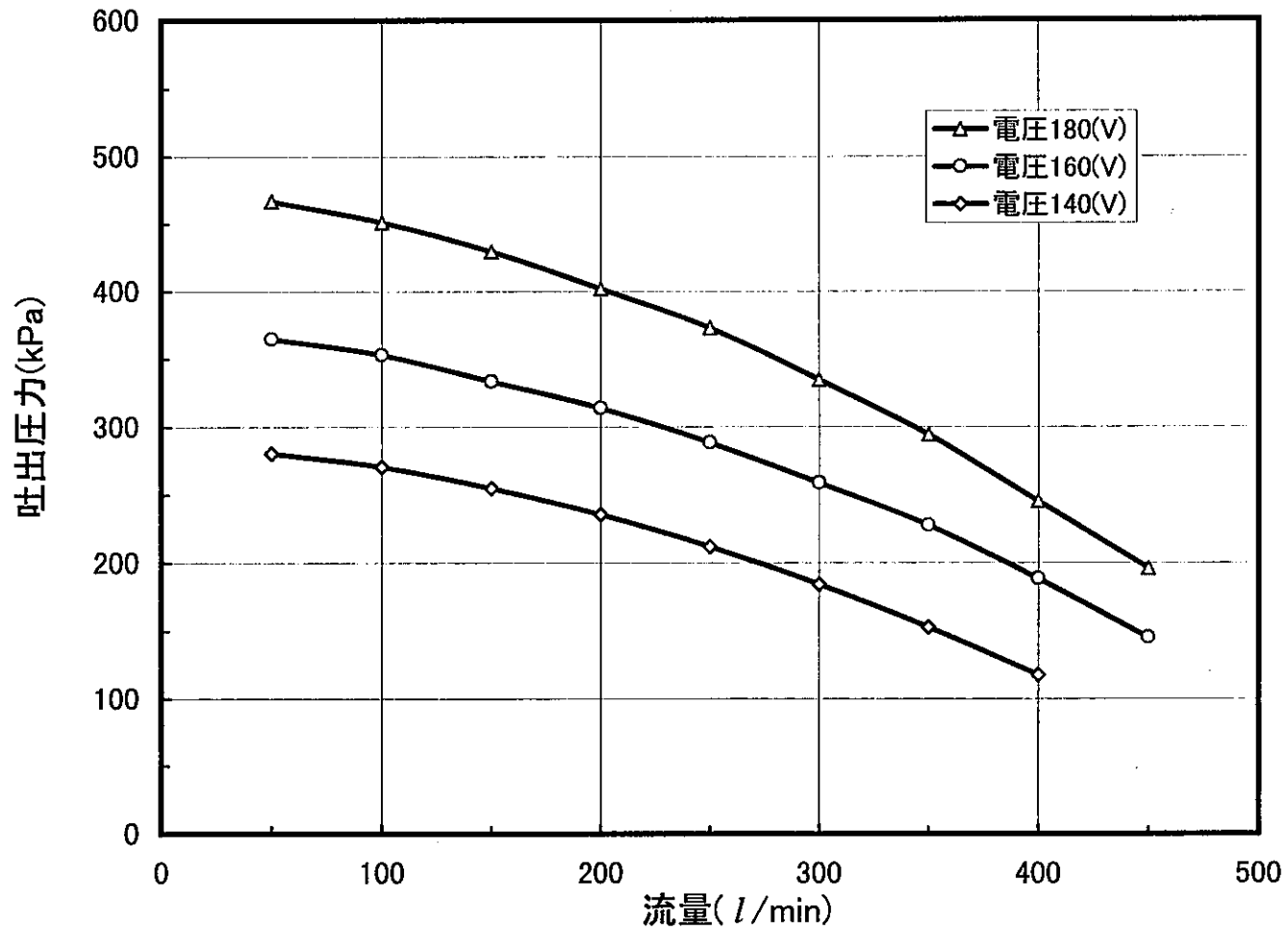


図-13 FLORA用電磁ポンプの予想性能(Na温度:550°C)

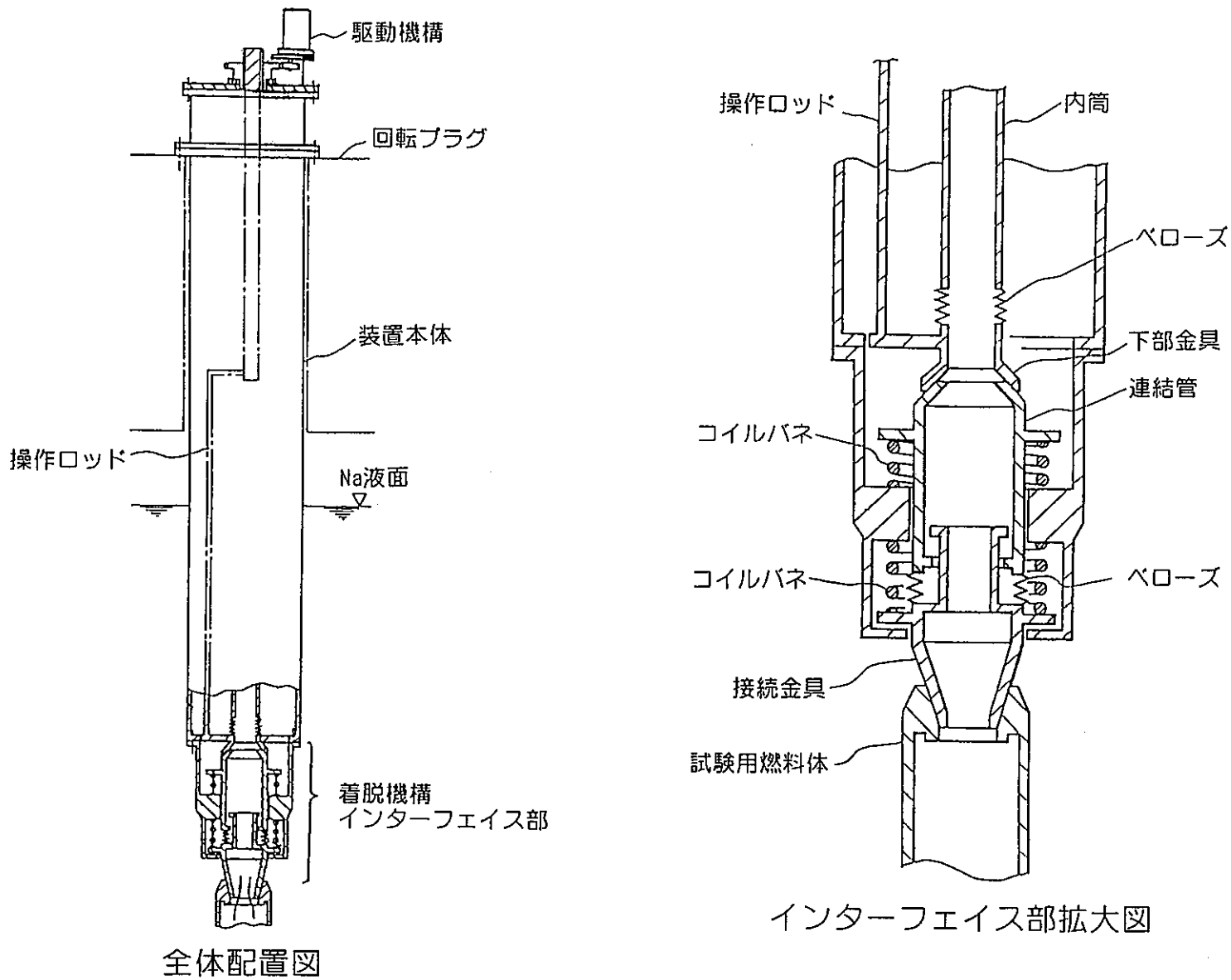


図-14 試験用燃料体との着脱機構構造図

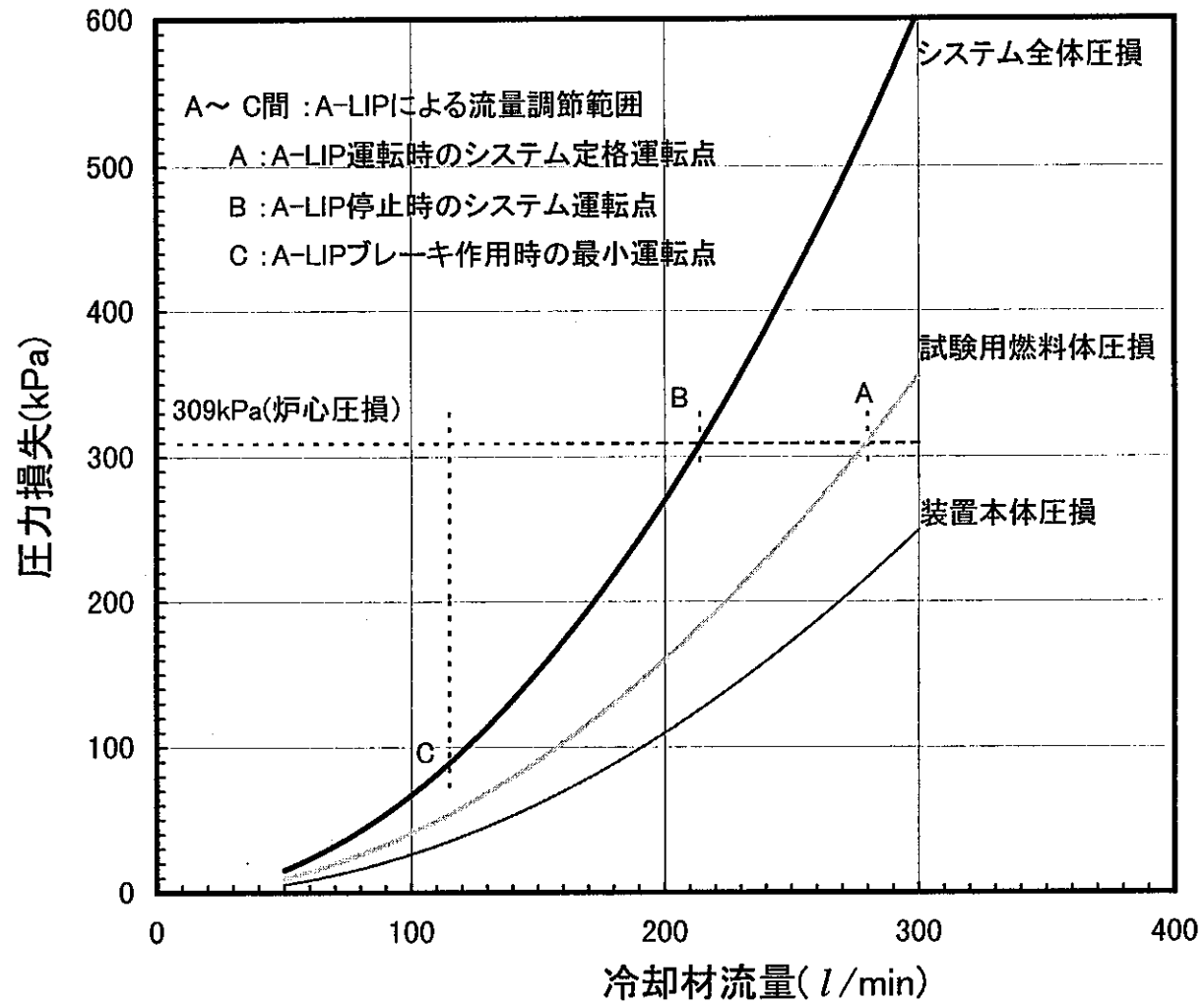
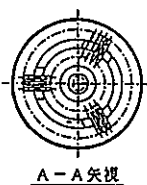
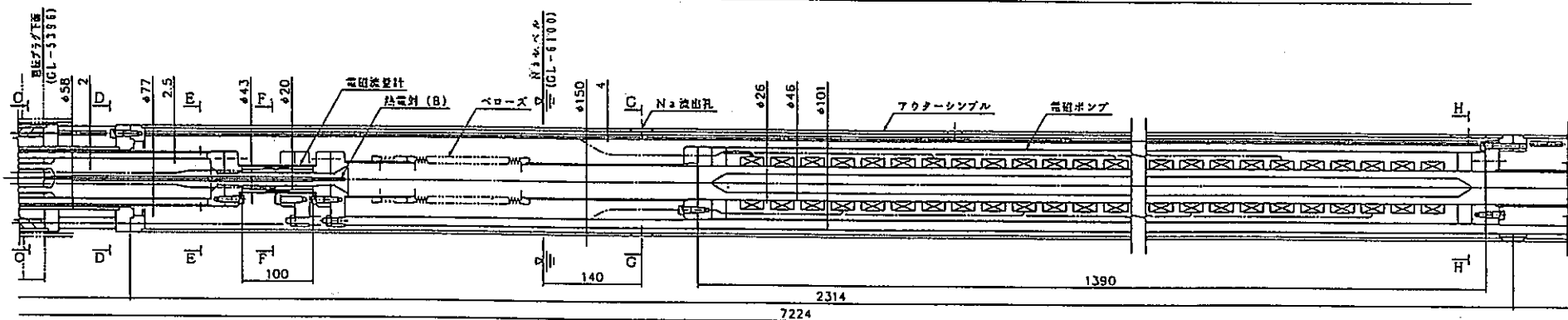
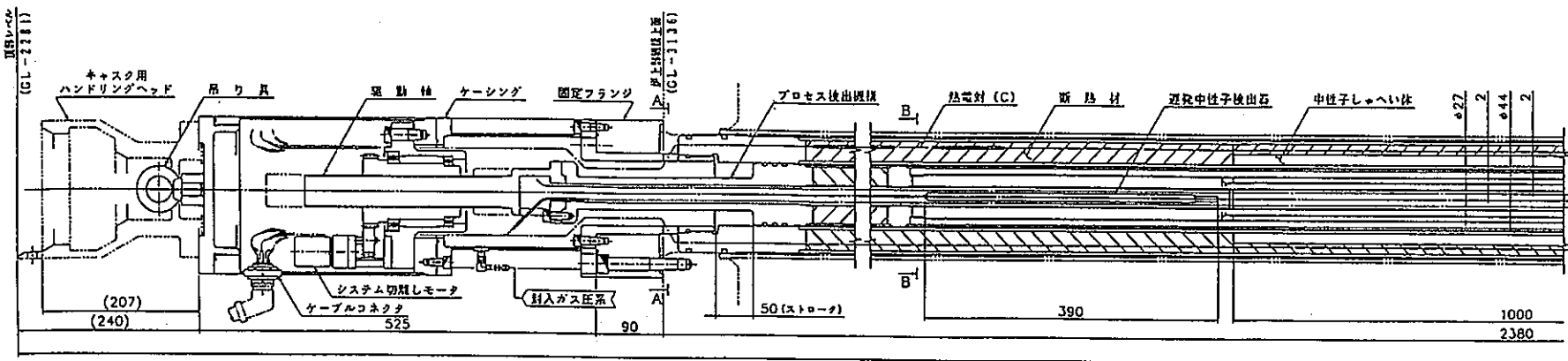
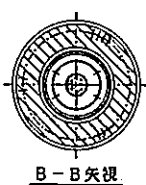


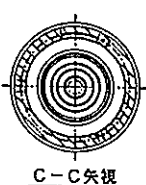
図-15 FLORAの圧力損失と流量調節範囲



A-A 矢視



B-B 矢視



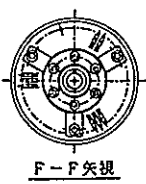
C-C 矢視



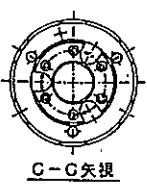
D-D 矢視



E-E 矢視



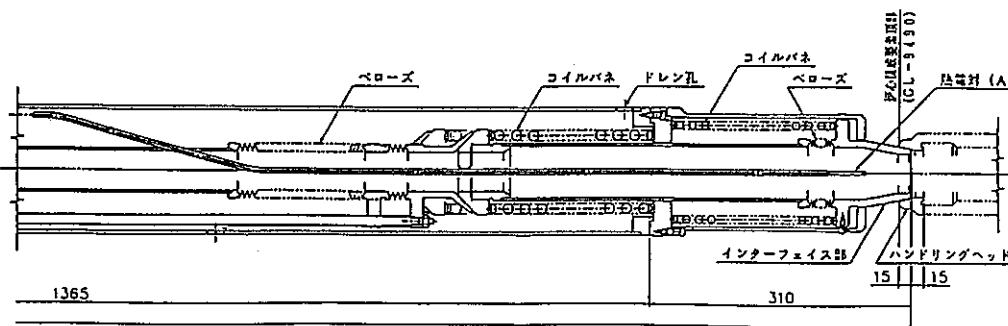
F-F 矢視



G-G 矢視



H-H 矢視



本図は、運転時（インターフェイス部運転時）状態を示すものである。

図-16 流量制御型照射装置 (FLORA) 全体組立構造図

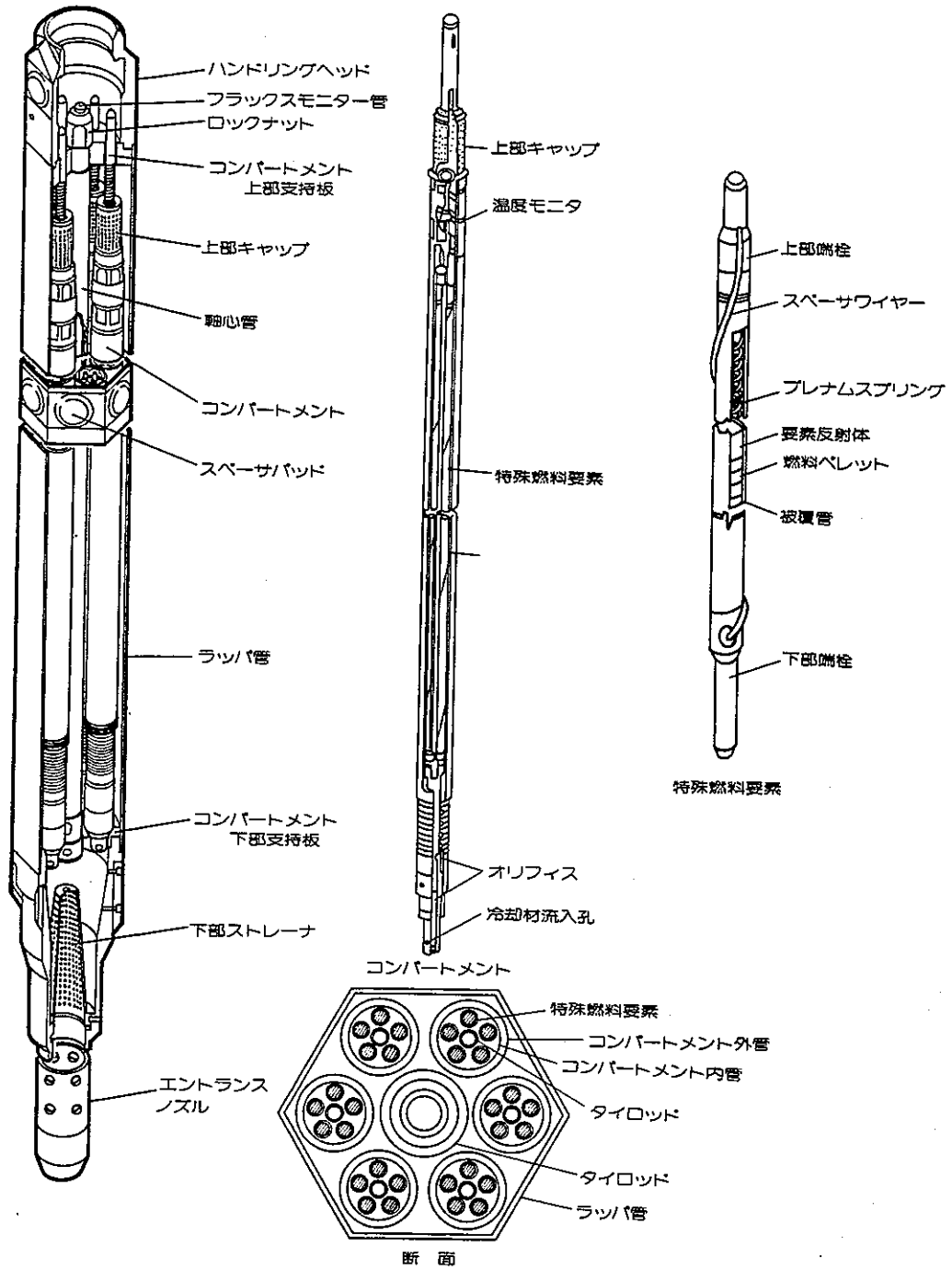


図-17 試験用燃料体構造図 (B型特殊燃料集合体の例)

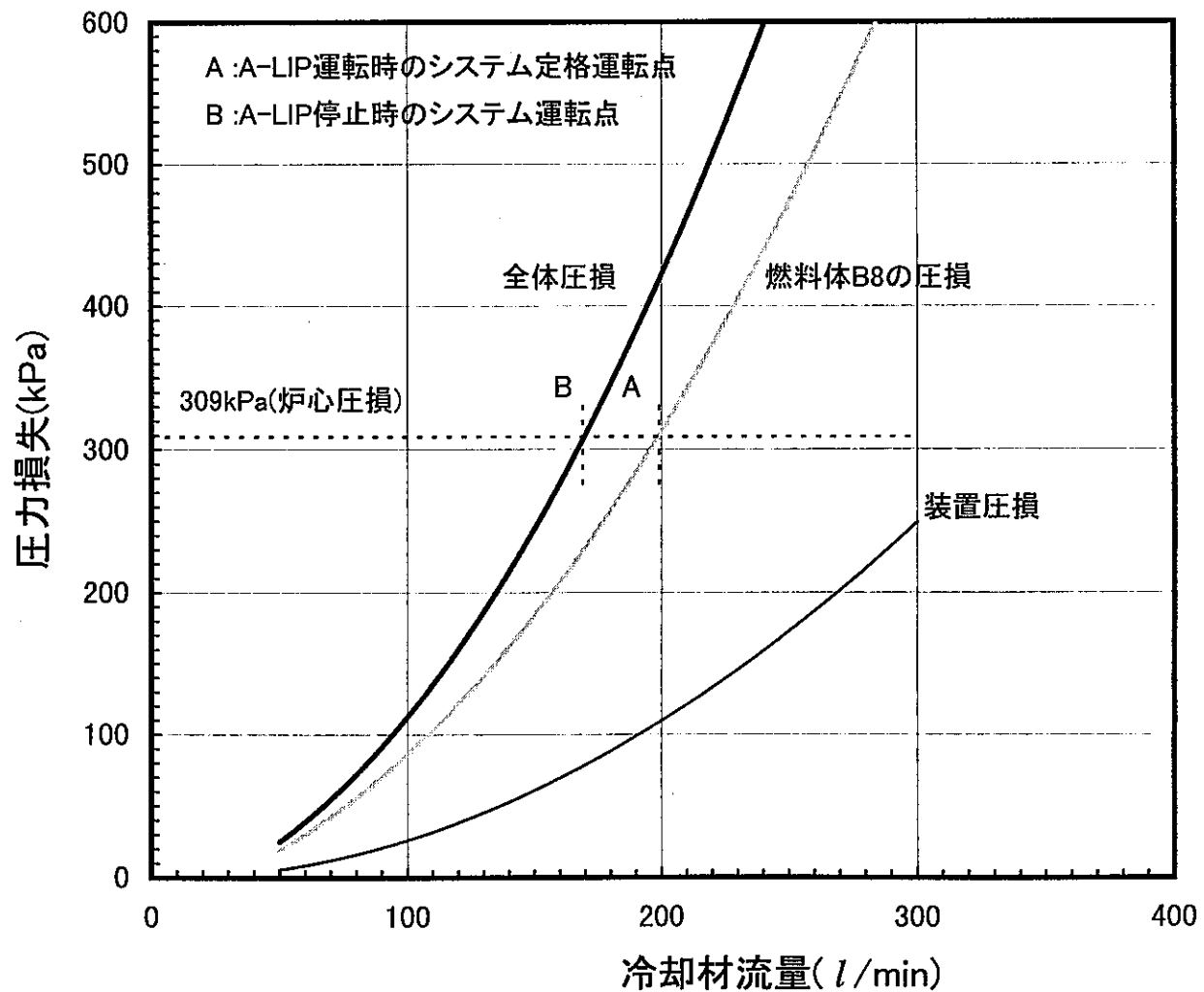


図-18 圧力損失とB8の流量調節範囲

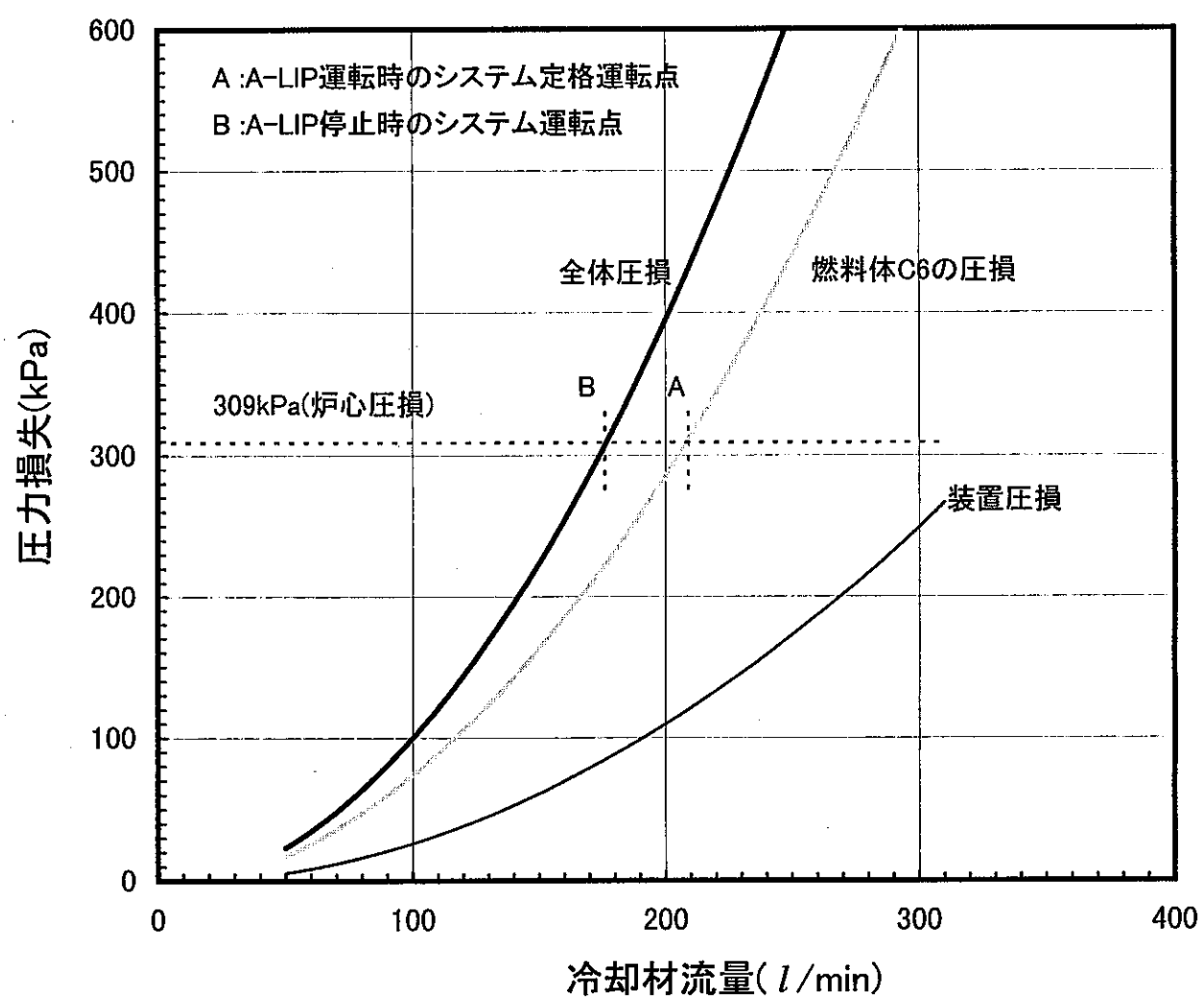
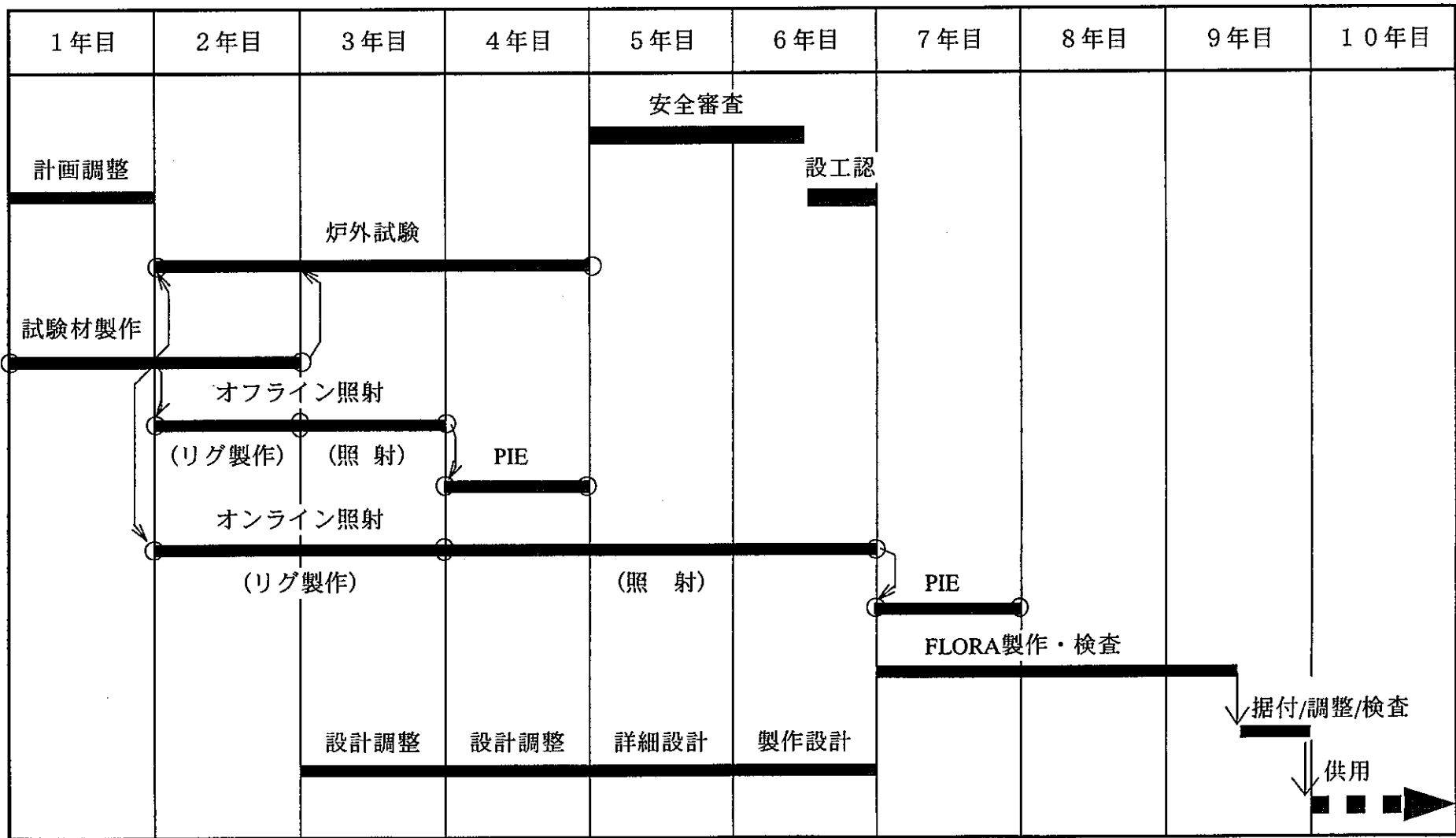


図-19 圧力損失とC6の流量調節範囲

5. 開発計画

今後、FLORAの開発については、燃料開発の進展状況とMK-IIIにおける炉の利用計画との整合を図りながら進めていく計画であるが、ここでは、4.5項で摘出された課題等とR&D類を基に開発計画を検討した。検討の結果、供用開始までに必要な期間としては、約9年間が必要と見積もられ、その内訳は、開発に約6年、製作を含む供用開始までにはさらに約3年が必要である。表-14に開発工程(案)を示す。

表-14 FLORA開発工程(案)



6. 結 言

FLORAの開発により得られた、成果、課題および今後の計画を以下に示す。

6.1 開発の成果

- (1) 燃料ピン1本の破損(破損面積 0.1cm^2)を想定し、破損燃料から放出される遅発中性子先行核に基づく中性子を、十分な感度(最小S/N比で7程度)で検出可能である。
- (2) 装置のキーコンポーネントである、流量調節用のNa浸漬式アニューラー型電磁ポンプ(A-LIP)の長さ1/2サイズでの炉外Na中試験まで終えた。この結果、FLORA用ポンプの要求性能である 550°C のNa中で流量 $300\text{l}/\text{min}$ 、吐出圧力 265kPa を達成できる見通しを得た。
- (3) 想定した試験用燃料体B3の冷却材流量を、A-LIPの流量調節機能でオンパワー時に調節することにより、燃料被覆管温度を十分制御可能なことが確認された。この時の流量調節能力は、ポンプ作用では定格流量から約75%まで、ブレーキ作用では定格流量の約75%から約40%まで調節することが可能である。
- (4) A-LIPの開発によって、試験に使用可能な燃料体の範囲が広がり、「常陽」のMK-II炉心において使用したほとんどの特殊燃料集合体が、FLORAでの破損限界試験に供することが可能になった。
- (5) これまでの検討を基に、装置の基本構造を設定した。

6.2 開発の課題

- (1) プロセス検出器の開発として、遅発中性子検出のための中性子検出器の小型化が必要な他、電磁流量計(EMF)用永久磁石の温度や中性子照射による減磁の影響を確認しておく必要がある。
- (2) A-LIPについては、中性子照射による影響が残された課題であるため、短尺(1/4or1/2)モデルのポンプを用いて、照射中の特性や絶縁性能等を確認しておく必要がある。
- (3) 装置の性能をより確実なものとするため、装置本体の流動試験を行い、詳細な圧力損失データを得る必要がある。
- (4) 試験用燃料体との着脱機構の許容偏芯量の確認や、詳細な生体遮へい機能の評価を

行い、その結果を構造設計へ反映して遮へい能力の確保を図る必要がある。

(5) 以上のような課題の解決を図りつつ、装置の詳細化と細部に渡っての安全性確認を行う必要がある。

(6) また、装置はMK-II条件でのシステム成立性を確認したものであるため、今後はMK-III条件への見直しが必要である。

6.3 今後の計画

FLORAの開発については、今後の燃料開発において、LOF型の炉内試験の必要性や被覆管温度を一定に制御した条件でのRTCB試験の必要性等が生じた時点で再開し、MK-IIIにおける炉の利用計画との整合を図りながら進める計画である。

なお、開発を再開して供用開始するまでの必要な期間としては、開発に約6年、製作に約3年の計約9年が必要と見られる。

7. 謝 辞

FLORAの開発においては、笠井重夫氏(現、東芝)、有井祥夫氏(現、システム開発推進部研究管理室)や、旧三菱原子力工業(現、三菱重工)の田中實氏、高橋俊夫氏、笠原芳幸氏はじめ多くの方々の協力を頂いた。

また、A-LIPのNa中試験においては、松澤秀貢氏(現、東芝)、軍司稔氏(JST出向中)ほか、旧機器構造開発部機器システム開発室の方々にご尽力頂いた。

ここに記して、深く感謝の意を表します。

8.参考文献

- 1) 籠田 栄一 他：「常陽」における照射技術
(4) 燃料設計限界に係わる限界照射技術
日本原子力学会「1994年秋の大会」予稿集,P4.
- 2) 動燃事業団：高速増殖炉開発の現状,1989年,p83.
- 3) 揃 政敏 他：高速実験炉「常陽」におけるオンライン計装照射技術
日本原子力学会誌 Vol.40, No.2, p124 (1998年2月)
- 4) ANL：GUIDE FOR IRRADIATION EXPERIMENTS IN EBR-II
- 5) 磯崎 和則 他：高速実験炉「常陽」建物、機器・配管系の耐震性再評価
PNC TN9410 97-069 (1997年7月)
- 6) 揃 政敏 他：「常陽」INTAによるオンライン照射データの解析
(1) オンライン計装の性能評価
日本原子力学会「昭和62年会」予稿集,F35.
- 7) 揃 政敏 他：「常陽」における照射技術
(2) オンライン照射装置の開発
日本原子力学会「1994年秋の大会」予稿集,P2.
- 8) H.Spitzer, A.Weller："Magnetisierungsverlust von Samarium-Kobalt Permanentmagneten in hohen Neutronenfeldern."
SNQIN/BH 22 05 84. Mai 1984.
- 9) 特許第02051950号, 高速炉用破損燃料検出装置の流量調節機構
- 10) 三井 久安 他：ナトリウム浸漬式電磁ポンプの開発
日本原子力学会「昭和62年会」予稿集,B20
- 11) 中崎 正好 他：高速増殖炉用高温電磁ポンプ
東芝レビュー, 43巻7号 (1988年)
- 12) 特許第02115974号, 破損燃料検出装置

別添資料

FLORAによる照射試験の想定案

(平成2年時点の検討)

FLORAによる照射試験の想定案

FLORAによる照射試験については、下記の3種類を想定した。

1. 定常運転中の燃料破損限界試験(RTCB)

燃料性能(特に高燃焼度化)向上のためには、燃料の寿命評価を精度よく行うことが必要であるが、このためには種々のパラメータにおいて燃料破損させたデータが必要である。

現在のMOX(Mixed Oxide)燃料についての寿命予測においても、かなりの不確かさをもっており、現設計(CDF(Cumulative Damage Fraction)評価法、FCCI(Fuel Cladding Chemical Interaction)の減肉評価法、PCMI(Pellet Cladding Mechanical Interaction)計算法及びそれによる寿命評価の不確かさ、等)はかなりの余裕をもっている。これを正確なものにするためには、統計的に意味のある数のRTCB試験を行い、破損メカニズムを定量的に解明しなければならない。

このためのRTCBを行う場合、温度条件を正確に把握して、破損時刻を明確にする必要がある。また、限定された試験期間で試験を完了するためには、温度を微調整して強制的に破損させることも必要である(従来の破損予測では安全側すぎて破損しないことが十分考えられる)。このため、照射装置として温度の微調整機能(=流量制御)と、温度計測、流量計測、破損検知機能が必要であり、この目的にFLORAは合致している(将来的にはTOP(Transient Over Power)-RTCBもこのカテゴリーに含まれる)。

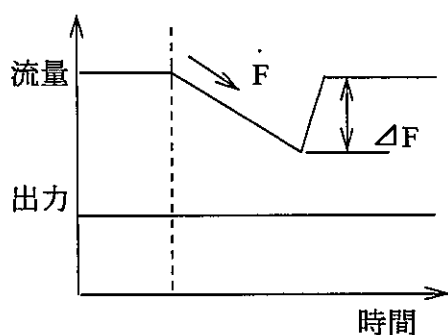
2. 過渡時(LOF型)の燃料破損限界試験(LOF-RTCB)

原子炉の熱的制限値及び熱設計基準値は、LOF型の”運転時の異常な過渡変化時”の燃料被覆管の破損限界によって決定されるが、これまで急速加熱パースト試験の炉外データのみを頼っており、どの程度安全余裕をもっているか実証されていない。これを、種々のパラメータのもとに燃料破損の限界を明らかにする必要があると考えられる。

言い換えれば、燃料の熱的な許容設計限界については、急速加熱パースト試験(炉外)データをクリーブ強度式に変形し、これによってCDF評価法を用いてLOF時の破損限界温度を定めているが、この”設計”法の余裕の程度等は十分実証されていないと考えられる。

このため、LOFを模擬して、下図に示すF及び ΔF をパラメータとした照射試験を種々の

条件(熱・材料の種類、寸法、初期温度レベル、燃焼度、等)で行い、データを評価する必



要がある(破損に至るLOFトランジェント回数を求めるのが、安全設計指針に最も忠実である)。

従って、この試験では、被覆材温度が $1\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ になるような速い変化率(F)で流量を $-10\sim -80\%$ 程度に変化させる必要があり、かつ、その時の流量、温度及び破損時刻を正確にモニターする必要

があり、この目的にFLORAは最適である。

なお、この試験を行うことによるFBRの燃料・プラントの設計及び建設への影響としては、熱設計基準の合理化による原子炉出口温度の高温化、燃焼度の向上等の設計の根幹に係る部分が改善されることが十分予想される。

3. 燃料破損後の安全性試験(Short-RBCB)

万一燃料破損が発生した場合において、破損検知が順調にいつても破損発生から炉停止まで10分～2日程度定格運転を続ける可能性は非常に大きい。この間の安全性を調べるために短期間のRBCBを種々のパラメータの下に行い、燃料の安全性を調べる必要がある。新型燃料の開発ではまず第一に必要であり、また、EBR-IIのRBCBデータにおいて、MOX燃料でも条件によっては注意が必要であることを示すデータが得られている(EBR-IIのORT(Operation Reliability Test)プログラムで、MOX燃料について完全にこの問題を解決するには、試験数が十分ではないと思われる)。

米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)でのカプセル封入照射の経験では、スタグメントNaにより実際より厳しすぎる結果が出るとの情報があり、評価データとしては適切ではないので、十分炉外でのNaとの共存性をチェックした後に、破損模擬照射を流動Na下で十全の監視下(流量計装、温度計装、破損検知計装)で行い、その挙動を把握する必要がある。また、MOXの例では流速の効果がRBCB時の燃料放出安定性に緊密である可能性が大きいことが分かってきたので、試験中に流速を変化させた試験を行う必要があり、このためFLORAはこの試験目的に合致している。