

JAERI - M
89-202

増殖ブランケット開発用試験装置の予備設計 (I)

1989年12月

炉設計研究室

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。
入手の問い合わせは、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、お申しこしてください。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, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

増殖ブランケット開発用試験装置の予備設計(I)

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部
炉設計研究室

(1989年11月8日受理)

本設計は、核融合エネルギーの実用化を目指したブランケット総合開発計画に反映することを目的とし、特に固体増殖材を使用する増殖ブランケットの開発に必要な開発手順と試験項目並びに試験設備について検討を行い、そのうちの下記試験設備について概念設計を行ったものである。

- 高熱負荷試験設備
- 伝熱・流動試験設備
- 健全性試験設備
- 製造技術開発設備

なお本設計は、川崎重工業（株）が炉設計研究室の委託の下に実施したものである。

Preliminary Design of Test Facilities
for Tritium Breeding Blanket Development (I)

Fusion Research System Laboratory
Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 8, 1989)

This report describes the results of the preliminary design of out-pile test facilities which are used for development of tritium breeding blanket with ceramic breeding material.

The facilities which were designed are as follows:

High heat flux test facility
Thermal-hydraulic test facility
Integrity test facility
Fabrication Technology Development Facility

This design study was performed by Kawasaki Heavy Industries, Ltd. under the contract to Fusion Research System Laboratory.

Keywords: Fusion Reactor, Tritium Breeding Blanket, Lithium Oxide, High Heat Flux, Thermal-Hydraulics, Integrity, Thermal Stress, Electromagnetic Force, Fabrication Technology, Test Facility, Research and Development

目 次

1. 序	1
2. 増殖ブランケット開発に対する考え方	2
2.1 増殖ブランケット概念	2
2.2 開発手順	4
2.3 試験装置概要	5
3. 設備設計	29
3.1 高熱負荷試験設備	29
3.1.1 設備の目的	29
3.1.2 試験項目および試験条件	30
3.1.3 主要機器・系統設計	35
3.2 伝熱・流動試験設備	38
3.2.1 設備の目的	38
3.2.2 試験項目および試験条件	38
3.2.3 主要機器・系統設計	39
3.3 健全性試験設備	40
3.3.1 設備の目的	40
3.3.2 試験項目および試験条件	40
3.3.3 主要機器・系統設計	41
3.4 製造技術開発設備	45
3.4.1 設備の目的	45
3.4.2 試験項目および試験条件	45
3.4.3 主要機器・系統設計	46
3.5 全体配置計画	47
4. 試験設備に関する重要課題の検討	90
4.1 増殖材温度制御に関する検討	90
4.1.1 体積発熱模擬方法の検討	90
4.1.2 増殖領域有効熱伝導率に及ぼすガス流速の影響	92
4.2 健全性試験における縮小試験体の効果に関する検討	95
4.2.1 電磁力試験に対する効果	95
4.2.2 耐圧試験に対する効果	96
4.2.3 熱応力試験に対する効果	97
5. 結 言	119
謝 辞	119

Contents

1. Introduction	1
2. Philosophy of Tritium Breeding Blanket Development	2
2.1 Concept of Tritium Breeding Blanket	2
2.2 Development Scheme	4
2.3 Outline of Test Facility	5
3. Design of Test Facilities	29
3.1 High Heat Flux Test Facility	29
3.1.1 Objectives	29
3.1.2 Test Items and Test Conditions	30
3.1.3 Major Components and System Flow Diagram	35
3.2 Thermal-Hydraulic Test Facility	38
3.2.1 Objectives	38
3.2.2 Test Items and Test Conditions	38
3.2.3 Major Components and System Flow Diagram	39
3.3 Integrity Test Facility	40
3.3.1 Objectives	40
3.3.2 Test Items and Test Conditions	40
3.3.3 Main Components and System Flow Diagram	41
3.4 Fabrication Technology Development Facility	45
3.4.1 Objectives	45
3.4.2 Test Items and Test Conditions	45
3.4.3 Major Components and System Flow Diagram	46
3.5 Layout of Test Facilities	47
4. Studies on Important Problems	90
4.1 Temperature Control of Breeding Blanket	90
4.1.1 Mock-Up Methods of Volumetric Heating	90
4.1.2 Influence of Gas Flow on Effective Thermal Conductivity of Breeding Zone	92
4.2 Scale Effect in Integral Test	95
4.2.1 Electromagnetic Force Test	95
4.2.2 Internal Pressure Test	96
4.2.3 Thermal Stress Test	97
5. Conclusions and Future Works	119
Acknowledgment	119

1. 序

増殖ブランケットはDT燃焼を行う核融合炉において、燃料の自給を行うために不可欠な機器である。ブランケットはプラズマに近接して設置されることから、高エネルギー中性子の重照射に加え、表面熱流束および内部発熱に基づく熱応力、プラズマディスラプション時の電磁力等の厳しい負荷を受ける。とくに、プラズマに面する第一壁部分では、プラズマからの粒子負荷によるエロージョン等、壁材料とプラズマとの相互干渉も問題となる。ブランケットはこれらの負荷に耐え、燃料自給を満たすための高いトリチウム増殖性能、燃料の連続供給および安全性の観点からの生成トリチウムの連続回収（低インベントリの達成）、炉の稼働率の向上および炉の運転自体に支障を与えないような健全性・信頼性の確保、さらに動力炉（商用炉）においては電力を得るための熱エネルギーの有効な取り出し等の機能を満足しなければならない。

ブランケットの開発にあたって、研究開発を要する項目は次のとおりである：

- ① 高増殖性能と高熱出力を達成するためのブランケット材料構成
- ② 生成トリチウムの連続回収を行うための増殖材温度制御技術
- ③ パージガス中の水分による増殖材の質量移行、熱サイクルによる増殖領域の物理的変化などに伴う性能変化
- ④ 第一壁部分等に対する高熱流束除去技術
- ⑤ 圧力、熱、電磁力等に対する健全性の確保
- ⑥ 冷却材喪失（LOCA）あるいは流量喪失（LOFA）時のブランケット過渡特性と安全性の確保
- ⑦ 第一壁流路の固相接合等を含む製造技術の開発
- ⑧ 炉概念およびブランケット概念にも影響を及ぼす遠隔操作技術の開発
- ⑨ トリチウム取扱い技術
- ⑩ 核融合炉雰囲気での各種材料特性

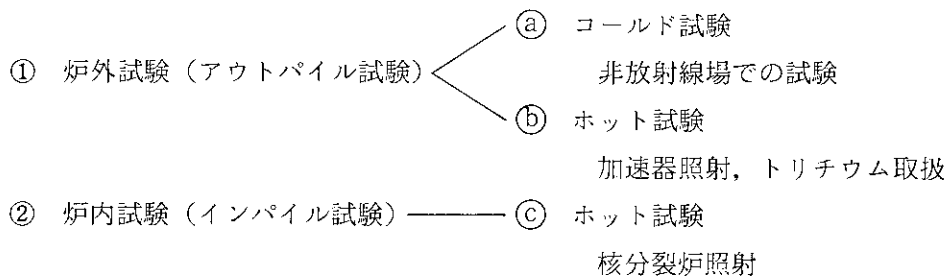
本設計は、核融合エネルギーの実用化を目指したブランケット総合開発計画に反映することを目的として、増殖ブランケットの開発に必要な開発手順と試験項目並びに試験設備について検討を加え、各種試験設備について概念設計を行ったものである。

ブランケットに要求される機能は核融合炉の開発段階（実験炉、原型炉、実証炉等）により異なると考えられるが、基本的には次の二つに大別される。

- ① トリチウム生産（発電なし）
- ② トリチウム・電力同時生産（動力炉志向）

これら二種類のブランケットはその構造概念や技術レベルに差があるので両者を一括して議論するのは実際的ではなく、順序として当面の目標である実験炉に設置されるブランケットの研究開発を先ず実施するのが妥当と考えられる。

またこれらのブランケットに関する開発試験は次のように分類される。



以上のことから本設計では、実験炉に設置されると予想される固体（セラミックス）増殖材を用いた低温軽水冷却ブランケットを念頭において試験項目・条件等を設置した。また上記各種試験のうち先ず炉外コールド試験に関する検討を行った。設計した試験設備は次のとおりである。

- 高熱負荷試験設備
- 伝熱・流動試験設備
- 健全性試験設備
- 製造技術開発設備

本設計の検討メンバーを以下に示す。

原 研：関 泰，関 昌弘，堀江知義，佐藤瓊介（業務協力員，川崎重工）
黒田敏公（同前）
川崎重工：山崎誠一郎，伊勢英夫，鈴木達志，岡崎士朗，毛利憲介，森 清治，
小林武司

2. 増殖ブランケット開発に対する考え方

2.1 増殖ブランケット概念

ブランケットの開発手順を検討する前に現在設計されているブランケットの構造概念を説明する。

(1) INTOR（国際トカマク型核融合実験炉）¹⁾

INTOR日本案におけるブランケット構造の一例をFig. 2.1.1に示す。これは、増殖材として固体（セラミックス）の Li_2O および冷却材として加圧水、構造材として316ステンレス鋼を用いたものである。また、トリチウム増殖性能向上のためベリリウム（Be）を中性子増倍材として使用している。増殖材および増倍材はいずれも小球状に成形してブランケット容器内に充填する。増殖材充填領域での核発熱は核発熱率分布に応じて配列した冷却管により除去する。また、増殖材の温度をトリチウムの連続回収が可能な範囲内（400～1000℃）に維持するため、冷却管および容器壁の周囲にヘリウムギャップ等の熱抵抗層を設ける。生成されたトリチウムはヘリウムのパージガスによりブランケット外へと運ばれ回収される。第1壁はプラズマからの高熱負荷を除去し、構造材温度を最高許容温度以下に維持するため、矩形断面の冷却流路を密に配置した設計となっている。このブランケットの主要設計仕様をTable 2.1.1に示す。INTORでは、上記のブランケットの他に、日本案として冷却材をヘリ

- ① 炉外試験（アウトパイル試験）
- ① (a) コールド試験
非放射線場での試験
 - ① (b) ホット試験
加速器照射，トリチウム取扱
- ② 炉内試験（インパイル試験）——— ② (c) ホット試験
核分裂炉照射

以上のことから本設計では、実験炉に設置されると予想される固体（セラミックス）増殖材を用いた低温軽水冷却ブランケットを念頭において試験項目・条件等を設置した。また上記各種試験のうち先ず炉外コールド試験に関する検討を行った。設計した試験設備は次のとおりである。

- 高熱負荷試験設備
- 伝熱・流動試験設備
- 健全性試験設備
- 製造技術開発設備

本設計の検討メンバーを以下に示す。

原 研：関 泰，関 昌弘，堀江知義，佐藤瓊介（業務協力員，川崎重工）
黒田敏公（同前）
川崎重工：山崎誠一郎，伊勢英夫，鈴木達志，岡崎士朗，毛利憲介，森 清治，
小林武司

2. 増殖ブランケット開発に対する考え方

2.1 増殖ブランケット概念

ブランケットの開発手順を検討する前に現在設計されているブランケットの構造概念を説明する。

(1) INTOR（国際トカマク型核融合実験炉）¹⁾

INTOR日本案におけるブランケット構造の一例をFig. 2.1.1に示す。これは、増殖材として固体（セラミックス）の Li_2O および冷却材として加圧水、構造材として316ステンレス鋼を用いたものである。また、トリチウム増殖性能向上のためベリリウム（Be）を中性子増倍材として使用している。増殖材および増倍材はいずれも小球状に成形してブランケット容器内に充填する。増殖材充填領域での核発熱は核発熱率分布に応じて配列した冷却管により除去する。また、増殖材の温度をトリチウムの連続回収が可能な範囲内（400～1000℃）に維持するため、冷却管および容器壁の周囲にヘリウムギャップ等の熱抵抗層を設ける。生成されたトリチウムはヘリウムのパージガスによりブランケット外へと運ばれ回収される。第1壁はプラズマからの高熱負荷を除去し、構造材温度を最高許容温度以下に維持するため、矩形断面の冷却流路を密に配置した設計となっている。このブランケットの主要設計仕様をTable 2.1.1に示す。INTORでは、上記のブランケットの他に、日本案として冷却材をヘリ

ウムとした2つの案が提案されている。表にはこれら2つのHe冷却ブランケットに対する仕様も示している。2つのうち1つはトリチウムの連続回収を行うもの(A), また他の1つは、炉の運転停止時を利用してトリチウムを回収する、いわゆるバッチ回収方式のもの(B)である。増殖材として Li_2O および中性子増倍材としてBeを使用し、これらを小球状ペブルとして混合充填することはいずれも上記の軽水冷却ブランケットと同じであり、ブランケット構造としても、容器内に冷却管を配列する概念はFig. 2. 1. 1と同じである。He冷却方式でも、トリチウムの連続回収を行う場合には軽水冷却ブランケット同様、冷却管および容器壁周囲に熱抵抗層を設けているのに対し、バッチ回収方式の場合には、その熱抵抗層を廃して構造の簡素化が図れる利点がある。

(2) FER (トカマク型核融合実験炉)²⁾

FER (昭和58年度設計)におけるブランケット構造概念と主要設計仕様をFig. 2. 1. 2とTable 2. 1. 2に示す。本ブランケットは、基本的に、Fig. 2. 1. 1のブランケットと同一の概念であるが、中性子増倍材のBeにシェル導体としての機能を兼用させる方式を採用している。これに対し、照射によるシェル導体の機能劣化の低減を考慮してシェル導体材料を銅合金(Cu-Be-Ni)とし、それによる増殖性能の低下を Li_2O とBeの小球混合充填により補おうとする設計もある³⁾。

(3) トカマク型核融合動力炉⁴⁾

動力炉のためのブランケットの設計例をFig. 2. 1. 3, 2. 1. 4およびTable 2. 1. 3に示す。Fig. 2. 1. 3は軽水冷却材を用い、容器内に配列された冷却管により増殖材(Li_2O 小球)の除熱を行うもので基本的に上述の実験炉用ブランケットと同様の概念である。Fig. 2. 1. 4は、 Li_2O よりも化学的に安定な LiAlO_2 を増殖材として使用しヘリウムによる直接冷却を行うとしたものである。 Li_2O を用いる場合にもヘリウム冷却を行うことは可能であるが、 Li_2O を直接冷却すると質量移行が増大することから間接冷却方式が採用され、Fig. 2. 1. 3に示した軽水冷却ブランケットと本質的に同様の概念となる。ただし、ヘリウムの入口温度を400°Cに設定することにより、トリチウムの連続回収に必要な増殖材の最低温度維持に対する構造簡素化(冷却管周囲の熱抵抗層の排除等)を図れる。

以上に述べたブランケットにおいては、固体増殖材の充填方式としては、ペブル充填方式が採られている。この他の充填方式としては、ペレット形状にするもの、板状にするもの等が提案されている⁵⁾⁶⁾。Table 2. 1. 4にこれらの比較を示す。増殖材の熱応力割れの防止、 Li_2O の質量移行によるブランケット外への増殖材移動量の低減、容器内への充填の容易さ等から、ペブル充填方式の長所が大きいと考えられ、ここでもペブル充填方式を採用したブランケットの開発について、とくに検討することとする。ただし、基本的にはペブル充填方式に特有の試験というものは少なく、これに対する開発装置を準備することで、他の方式のブランケット開発試験にも適用が可能である。

参考文献

- 1) T. Kobayashi, H. Iida et al., "Japanese Contributions to IAEA INTOR

Workshop Phase Two A Part 3 Session XV Group F (First Wall/Blanket/ Shield/Divertor)", (1987.7)

- 2) 田中義久, 小林武司 et al., " 核融合実験炉 (FER) 炉内構造物の概念設計", 川崎重工技報第87号, (1985.1) 16-26
- 3) 鈴木達志 et al., " トリチウム生産ブランケットの開発", FAPIG 第110号, (1985.7) 36-42
- 4) 東稔達三, 関 昌弘 et al., " 核融合動力炉ブランケット・システムの技術的検討", JAERI-M 87-017, (1987.3)
- 5) INTOR Report, " International Tokamak Reactor Phase One", IAEA, (1982)
- 6) D. L. Smith et al., " Blanket Comparison and Selection Study", ANL/FPP-84-1, Argonne National Laboratory, (1984)

2.2 開発手順

増殖ブランケットに対する全体開発手順をFig. 2.2.1に示す。開発手順は大きく分けて、非放射線場での炉外コールド試験と放射線場でのホット試験とからなる。ホット試験はさらに、核融合炉以外の雰囲気（核分裂炉、高エネルギー中性子照射装置、トリチウム取扱い施設等）で行うものと核融合炉雰囲気（核融合実験炉）で行うものとに分けられる。開発に際しては、コールド試験と核融合炉雰囲気以外のホット試験が相互にデータの提供およびフィードバックを行いつつ並行して進められるであろう。これらの結果を基に、実験炉等の核融合雰囲気においてブランケットテストモジュールを用いた総合的な機能試験が行われることになる。さらに、動力炉を志向したブランケットに関しても同様のコールド試験および核融合炉以外のホット試験や実験炉でのテストモジュール試験を経て、最終的には原型炉において総合機能試験が行なわれることになる。さらに動力炉ブランケットでは中性子の重照射に耐える材料開発が不可欠である。また図中には示されていないが、放射性廃棄物（放射化した構造材およびトリチウムを吸蔵した材料）の安全処理・処分法の技術を確立しておく必要がある。

Fig. 2.2.2～2.2.5にはFig. 2.2.1中の高熱負荷試験、伝熱流動試験（主に増殖材充填領域に関するもの）、構造健全性試験および製造技術の開発の4項目における開発手順および他の開発試験との関連等を示した。本設計では、以上のコールド試験に必要な設備の基本仕様を明らかにした。

参考文献

- 1) M. Abdou et al., " Technical Issues and Requirements of Experiments and Facilities for Fusion Nuclear Technology FINESSE Phase I report", PPG-909 UCLA-ENG-85-39, (1985.12)
- 2) M. Abdou et al., " Modeling, Analysis and Experiments for Fusion Nuclear Technology FNT Progress Report :

- Modeling & FINESSE” , PPG-1021.UCLA-ENG-86-44.FNT-17, (1987.1)
- 3) 東稔達三, 関 昌弘 et al., “核融合動力炉ブランケット・システムの技術的検討”,
JAERI-M 87-017, (1987.3)

2.3 試験装置概要

本設計では、増殖ブランケットに対する開発項目を2.2項に示す4つに分け、それぞれに対する試験設備および技術開発設備を独立に設置するものとした。高熱負荷と健全性および製造技術開発と健全性等、性能および特性が密接に関連し合うものについては、一つの試験によって他の効果の検討も行えるよう配慮するものとした。Table 2.3.1～2.3.4に各設備での試験項目および試験装置等をまとめて示す。

高熱負荷試験設備では、ディスラプション時の熱負荷および通常運転時の熱負荷に対するプラズマ対向壁面の挙動を試験すると共に、健全性に関する検討も行う。装置としては、表面熱流束熱源としての電子ビーム照射装置等を備えたものを考慮した。

伝熱流動試験設備では、主に増殖材の温度制御に関する試験を行うと共に、増殖材充填領域でのパージガス流動挙動および冷却材の流量配分等について検討する。増殖領域で問題となる体積発熱については、実機内での発熱状況を再現することは難しく、ここでは増殖領域内へのヒータ配置による特性把握を行うこととした。装置としては、冷却材循環システム、パージガス供給システム、および加熱ヒータ用電源等が必要とされる。技術的にはヒータ埋込み等のブランケット特性模擬を施した試験体構造の工夫が重要となる。

健全性試験設備では、圧力および熱、電磁力の各荷重に対する試験を行うと共に、これらの重畳効果についても検討する。ただし、表面熱流束による熱応力に対しては、上記の高熱負荷試験設備および冷却管周囲熱抵抗層用スペーサ管と増殖材の間の熱膨張差に伴うインタラクションについては伝熱流動試験設備を活用できるものと期待される。電磁力試験に対しては、1対の定常磁場コイル内にプラズマ電流の模擬コイルを設けた装置を設置するものとした。定常磁場内に試験体を置き、プラズマ模擬コイルの電流を変化させることにより、試験体に生じる電磁力およびそれに基づく応力等の検討を行うものである。

製造技術開発設備では、主に増殖材の製造法とくに小径ペブル大量製造法と第1壁を含むブランケット容器の製作・組立法に対する開発を行う。ここでは、増殖材製造に対して造粒装置および焼結装置等を備え、ブランケット容器製作に対しては、HIP, TLP, 真空ろう付, 電子ビーム装置等により種々の接合, 組立法等を検討することになる。

Fig. 2.3.1, 2.3.2に本施設の全体配置計画を示す。ここでは、高熱負荷試験設備および伝熱流動試験設備, 健全性試験設備を一つの建家内に、また製造技術開発設備を別建屋内に配置する計画とした。

Table 2.1.1 Major design parameters of tritium breeding blankets for INTOR¹⁾

	Li ₂ O/Be/H ₂ O/AS*	
	(A)	(B)
Blanket Thickness	500 mm (including first wall)	
First Wall	Integrated with blanket	
Thickness	15.5 mm (2.5/5/8 mm)	18.0 mm (2/7/9 mm)
Material	Type 316 stainless steel	Titanium modified austenitic stainless steel (PCA)
Coolant	H ₂ O	He
Pressure	1.5 MPa	4.0 MPa
Temperature(In/Out)	60/100°C	100/300°C
Flow Direction	Toroidal	Toroidal
Channel Area	5mm ^w × 5mm ^d	7mm ^w × 7mm ^d
Pitch	7.5 mm	9.5 mm
Maximum Velocity	2.7 m/s	78 m/s
Pressure Losses	~90 kPa	~160 kPa
Wall Maximum Temperature	<200°C	<400°C
Breeder Region	Homogeneously mixed Li ₂ O and Be pebbles of 1 mm in diameter	
Material	70% in bulk and 30% at near wall	
Packing Fraction	25 v/o of Li ₂ O and 75 v/o of Be	
Mixing Ratio	85 %T.D.	
Li ₂ O Density	Natural	
⁶ Li Enrichment		
Tritium Breeding		
Local TBR	1.54	1.65
Breeder Temperature		
Operation	450 - 750°C	100 - 650°C
Allowable Range	400 -1000°C	<1000°C
Minimum Temperature	Helium gas gap around coolant tubes	None
Control Method		
Coolant Tube	316 SS	PCA
Size (ID/OD)	8/10 mm	20/24 mm
Coolant	H ₂ O	He
Pressure	1.5 MPa	4.0 MPa
Temperature (In/Out)	60/100°C	100/300°C
Flow Direction	Poloidal	Poloidal
Maximum Velocity	4.7 m/s	72 m/s
Pressure Losses	~300 kPa	~100 kPa
Tritium Recovery	Continuously with purge gas stream	Discontinuously during reactor shutdown
Purge Gas	He (0.1 MPa)	He (0.1 MPa)
Flow Rate	200 Nm ³ /hr	2400 Nm ³ /hr
Heat-up		Up to 450°C with Primary Cooling System
Recovery Time		About 1 day

* AS: austenitic stainless steel

Table 2.1.2 Design parameters of first wall/tritium breeding blanket (1983FER)²⁾

<u>First Wall</u>	
Configuration	Integral with Blanket
Form	Ribbed Panel
Structural Material	Type 316 Stainless Steel
Coolant	Pressurized Water(H ₂ O, 1.5MPa)
Flow Direction	Toroidal
Inlet/Outlet Temperature	60°C/100°C
Wall Thickness	
Beginning-of-Life/End-of-Life	15mm/10mm
Maximum Wall Temperature	
During Normal Operation	221°C
<u>Blanket</u>	
Blanket Type	Tube-in-Shell Type(BOT/NM)
Thickness (including F/W)	
Inboard/Outboard	40cm/50cm
Structural Material	Type 316 Stainless Steel
Breeder	Li ₂ O(30% ⁶ Li enrichment)
Form	Spherical Pebble(1mm ϕ)
Effective Density	85%T.D.
Packing Fraction	0.7(bulk)
Acceptable Temperature Range	400°C-1,000°C
Neutron Multiplier	Beryllium
Shell Conductor	Beryllium
Location	Outboard(6cm ²)
Coolant	Pressurized Water(H ₂ O, 1.5MPa)
Inlet/Outlet Temperature	60°C/100°C
Flow Direction	Poloidal
Tube ID/OD	8mm/10mm
Net Tritium Breeding Ratio	1.05
Tritium Recovery	Continuously by Helium Purge Gas
Flow Rate	200Nm ² /hr(0.1MPa)

Table 2.1.3 Major design parameters of power reactor blankets⁴⁾

Blanket concept	PCA/Li ₂ O/H ₂ O/Be	Mo-alloy/Li ₂ O/He/Be	Mo-alloy/LiAlO ₂ /He/Be
Thermal Power/gross electric power (MW)	3820/1320	3720/1810	3510/1710
Neutron wall loading (MW/m ²)	3.3	3.3	3.3
Heat flux on the first wall (MW/m ²)	0.9	0.9	0.9
Nuclear heating in the first wall (MW/m ²)	43	27	27
Structural material	Ti-modified SS	Mo-alloy	Mo-alloy
Maximum temperature of structural material (°C)	423	852	852
Breeder/neutron multiplier	Li ₂ O/Be	Li ₂ O/Be	LiAlO ₂ /Be
⁶ Li enrichment (%)	30	30	95
Breeder configuration	outside tube	outside tube	inside tube
Temperature range of breeder (°C)	450-950	400-950	400-725
Tritium recovery	He purge stream	He purge stream	He coolant
Outboard/inboard local breeding ratio	1.20/1.13	1.37/1.32	1.24/1.17
Net breeding ratio	1.03	1.19	1.06
Coolant	H ₂ O	He	He
Pressure (MPa)	15.5	9	9
Inlet/outlet temperature (°C)	280/320	400/700	400/700
Flow direction: first wall/breeder region	toroidal/poloidal	toroidal/poloidal	toroidal/toroidal
Maximum velocity: first wall/breeder region (m/s)	7.9/7.1	63/52	63/8.1
Pressure drop (MPa)	0.37	0.11	0.11
Number of primary cooling loops	4	7	7
Pumping power (MW)	26	109	103
Steam pressure/temperature (MPa/°C)	6.5/280	24.6/538	24.6/538
Gross thermal efficiency (%)	34.4	47.2	47.2

Table 2.1.4 Comparison of solid breeder forms

増殖材形状	概念例	増殖領域の健全性	ブランケット製作の容易さ	構造複雑さ
ペブル形態	<p>C冷却材 T冷却管 SB増殖材 Pトリチウムペーパーガス</p>	<p>小球採用により熱応力割れの問題を避けられる。 Li₂Oを使用した場合には高温部となる質量移行については高温部で生成したLiOTが低温部(400℃以上)で再分解する為、トリチウムベントリは過大とならない。</p>	<p>ブランケット容器製作・試験後に充填が行える為、雰囲気制御が容易であり、容器接合時等における増殖材汚染が防止できる。</p>	<p>増殖領域は、冷却管、増殖材ペブルで構成されシンプルである。</p>
ペレット形態	<p>Bトリチウム障壁 M減速材</p>	<p>増殖材の熱応力割れを防ぐには肉厚が極端に薄くなり非現実的となる。</p>	<p>ブランケット製作時に増殖材も同時に装荷する為、雰囲気制御および増殖材汚染防止が難かしい。</p>	<p>通常減速材が必要とされ、その冷却系及び減速材へのトリチウム吸着を避けるためのトリチウム透過防止壁が必要となる。</p>
プレート形態	<p>CTケーシング板</p>	<p>増殖材の熱応力割れを防ぐには極薄板構造となり機械割れの恐れがある。 また、増殖材のケーシング用構造材量が大きく増殖性能に悪影響を及ぼす。</p>	<p>同上</p>	<p>ブランケット容器に冷却材の圧力が、かかからない構造にする為、複雑構造になることが予想される。</p>
ブロック形態		<p>増殖材の熱応力割れを防ぐにはブロックを小片に分割する必要があり最終的にはペブル型の概念となる。</p>	<p>同上</p>	<p>ペブル型と同様、比較的シンプルであるが、ブロックの位置決め機構が必要である。</p>

Table 2.3.1 Test items in high heat flux facilities (1/2)

施設名：高熱負荷試験設備 (1/2)	Table 2.3.1 Test items in high heat flux facilities (1/2)		Table 2.3.1 Test items in high heat flux facilities (1/2)		Table 2.3.1 Test items in high heat flux facilities (1/2)		
試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
基礎試験 (基礎データの取得)	材料物性値	熱伝導率, 比熱, 膨張係数, 強度等	既存データ調査 各種試験装置利用	金属(ステンレス鋼, タングステン)黒鉛, C-C複合材, 接合部 物性値 実験範囲	各種試験装置(既存)	表面熱流束熱源 計測系(トランジエントコンバータ等)	ある程度のデータは原研/川重等にて取得済(以下同じ)
ダイスラップシオン挙動 要素試験 (短時間の高熱流束負荷に対する壁表面の挙動に関する知見を得る。)	熱流束特性 損耗量	熱流束値, 空間分布, 時間変動 蒸発(昇華)量, 浴融厚 粒子放出 浴融層移動	カロリメータ, フェアラ デカップ等 冶金学的観察, 重量測定 冶金学的観察, 高速撮影 高速顕微鏡 冶金学的観察	5ms~1s 数10MW/m ² ~ 数100MW/m ² ダイスラップシオン条件 実験炉第1壁 5ms~20ms 約100MW/m ² 実験炉ダイハータ 1ms~5ms 約1000MW/m ² 実用炉 不明(数10~ 数100ms) 不明(数10~ 数100MW/m ²)	熱照射面積 >数10mm× 数10mm	表面熱流束熱源(EB /イオンビーム) 出力>100KW 制御機構 計測系 高速ビデオカメラ クラックメータ	電磁場中での移動については別設備 既存試験装置(熱源) EB 60KW 1ms~連続 PBEP 4MW 0.1s 建設中(熱源) EBIF 300KW
健全性	健全性	組織変化 亀裂発生, 進展挙動	冶金学的観察, EPMA 冶金学的観察, クラックメータ				
接合部熱サイクル疲労	接合部熱サイクル疲労	脆性(延性)破壊挙動	熱照射後の観察 冶金学的観察, 歪み測定				
通常運転時挙動要素試験 (強制冷却される連続 的な高熱流束の除去お よび, これによる応力 等に関する知見を得 る。)	伝熱・流動特性 (片面加熱)	上記の全てについて 熱流束 熱伝達率(分布), 沸騰, バーニアウト, 圧力損 失, 変動, 流量分布 温度分布, ギャップコン タクトンス (機械接合の場合) 上記の全てについて 熱流束	カロリメータ, フェアラ デカップ等 熱電対, 圧力計, 差圧計, 流量計等 熱電対	壁水(実用炉ではヘリ ウムガス, 液体Li等も ありうる。) 数10s以上 0.5~数MW/m ² (最大10MW/m ²) 実験炉第1壁 0.5~1MW/m ² 実験炉 ダイハータ/リミタ 数MW/m ² 実用炉第1壁 約1MW/m ² 実用炉 ダイハータ/リミタ 約10MW/m ²	熱照射面積 第1壁モックアップ >1m ² ダイハータ/リミタモ ックアップ >0.5m ²	表面熱流束熱源(ビー ム熱源, 放射熱源等) 出力, 数MW 制御機構 冷却材ループ 壁水(ガス/液体金属) 流量 計測計 温度測定系 流量, 圧力測定系 歪み測定系	基礎的データは既存ループ等の利用可 NBIビームダンプ等についても利用可能

Table 2.3.1 Test items in high heat flux test facilities (2/2)

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
部分モックアップ実証試験 (第1壁, ダイバートルノリミタの部分モデルを試作し, その特性を実証する。)	熱応力, 熱サイクル疲労 温度分布, 応答 応力分布, 応答 接合部健全性	構造材熱応力 接合部熱応力 アーマー/接合部/構造材 熱サイクル疲労 温度 歪み 接合部健全性 熱流束	歪み測定, 冶金学的観察 熱電対等 歪みゲージ等 冶金学的観察 カロリメータ, フォアラ デカップ等	前述の条件	数 m^2 以上 (フランケット容器, ダイバートルノリミタの 実機形状部分試験体)	表面熱流束熱源 (ヒューム熱源) 出力 数MW 制御機構 冷却材ループ 軽水 流量 約 $1000 m^3/h$ 試験体取付治具 計測系	
過負荷試験 (設計値を上回る過大な熱負荷に対する破損状態に関する知見を得る。)	温度応答 正力応答 限界熱流束 破損状態	温度 歪み 破損状態	熱電対等 歪みゲージ等 肉眼観察, 冶金学的観察	連続負荷 数 $10 MW/m^2$ 短時間負荷 (ディストラ クション) 数 $100 MW/m^2$			

Table 2.3.2 Test items in thermal-hydraulics test facilities (1/2)

試験項目	試験	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様 あるいは熱源用電源冷却系	備考
基礎試験	熱抵抗層特性試験	管周閉, 容器壁固閉等 (ギャップ抵抗, 固体熱抵抗抵抗等)	各部温度, 入熱量等 熱抵抗層入熱量および 反対側温度, 入熱量	各種試験装置を使用 入熱量と反対側の温度 差および入熱量から抵 抗値を算出	管内面熱流束: $\leq 0.5 \text{ MW/m}^2$	10~30 mm ϕ $\times 100 \sim 300 \text{ mm}^L$ (冷却管1本を対象) or 200 \times 200 mm 平板型	表面熱流束熱源 あるいは熱源用電源冷 却系 熱源 (ヒータ) 用電源 : 1.5 KW 冷却系 (ポンプ, 配管) : H ₂ O, 0.1 MPa, 1 ~3 m ³ /h ガス供給系 (ポンプ, 配 管): He, N ₂ , Ar, 空気	熱源は測定装置内に組込まれているものが多 い。 FER テストモジュールでは管内面熱流束 0.05 ~0.3 MW/m ² 動力炉用フランジケットでは, 0.1 ~ 0.25 MW /m ²
	増殖領域有効熱伝導率 試験	バルク部, 壁面付近	領域内各部温度, 入熱 量	各部温度差と入熱量か ら熱伝導率を算出	熱流束: $\leq 0.5 \text{ MW/m}^2$ or 温度: 400 ~ 1000 °C	~200 \times 200 \times 100 ^L mm or ~200 ϕ \times 300 ^L mm	熱源 (ヒータ) 用電源 : 100 KW 冷却系 (ポンプ, 配管) : H ₂ O, 0.1 MPa, \leq 50 m ³ /h ガス供給系 (ポンプ, 配管): He, 空気	
	パージガス流動試験	ベブル充填層内ガス流 動	パージガス流動流量分 布 入口/出口圧力	流れ可視化等による流 量分布の確認 流量, 出入口圧力等か ら, 圧力損失計算式の 確認	ガス流量: 0.5 ~ 500 m ³ /h		熱源 (ヒータ) 用電源 : ~50 KW 冷却材 (ポンプ, 配管) : $\leq 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ガス供給系 (ポンプ, 配管): He, N ₂ , Ar, 空気 フロー: $\leq 500 \text{ m}^3/\text{h}$	第1段階として, 冷却管を接続せず, 容器内 にベブルのみを充填して試験 第2段階として, 1本あるいは複数の冷却管 を接続する。 温度勾配がある場合の影響について検討 空気をを用いてベブル充填層での圧降挙動につ いてもデータ取得
	冷却材流量配分試験	第一壁 (容器壁) 流路 増殖材式頭領域冷却管	各冷却管流量 入口/出口圧力 入口/出口温度	各冷却管出口温度が一 律となる流量配分の確 認 (および流量制御方 法についても検討)	管内流束: 0.1 ~ 2 m ³ /s 2 ~ 10 m ³ /s	実テストモジュールあ るいは実フランジケッ ト ただし冷却管は各領域 (例えば プラズマ側, 中央, 後壁側) に対し て1本あるいは数本ず つのみを設ける。	冷却系 (ポンプ, 配管) : H ₂ O, 0.1 MPa, \leq 200 m ³ /h 熱源 (ヒータ) 用電源 : $\leq 500 \text{ KW}$ (各冷却管 列に対応した加熱源)	FER テストモジュールでは管内流速 0.4 ~ 1.5 m/s, 動力炉では 2 ~ 7 m/s (いずれも水 冷却の場合) 第1段階は非加熱 (第2段階で各冷却管列に 対応した入熱量の分布を考慮)

Table 2.3.3.2 Test items in thermal-hydraulics test facilities (2/2)

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および主任様	備考
増殖材温度制御試験 (冷却管複数本の領域を対象)	増殖材温度分布 (最高温度, 最低温度, ホットスポット)	領域内各部温度	各部温度より熱流束を 確認 2D, 3D効果の評価	体積発熱率: 1~10MW/m ³ を 機軸 (増殖材温度: 400 ~1000°C) くり返し負荷を考慮	実プラントの1/4 ~1/2以上の断面積 あるいは冷却管10~ 20本を収容する面積 長さ>0.5~1m	体積発熱機軸タータ電 源および容積発熱加熱用 熱源: ~350KW 冷却系(ポンプ, 配管) : ≤100 m ³ /h ガス供給系(ポンプ, 配管): He, N ₂ , Ar 0.1MPa, 5 m ³ /h	FER子テストモジュール内発熱率: 1~10MW /m ³ 体積発熱に関する詳細については、発熱率の 確認を含め、ホット試験で実証する。 2種類のペブル材料を混合充填した場合につ いても試験

Table 2.3.3 Test items in integrity test facility (1/3)

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
基礎試験 炉内試験 冷却材圧力	各材料、複合材等の基礎的強度データ 第一壁等 応力分布、変形量	引張強度、降伏強度、衝撃強度、破壊靱性値等 負荷圧力 各部歪量	各試験装置を使用して 歪量より応力値を算出 評価	負荷圧力で ≤ 2.0 MPa および ≤ 17 MPa	小部分モデル(平版部およびコーナー部)各30~50cm) 中部分モデル(30~50 th cm x 全プラランケット幅、ヘッダ部を含む) 各試験体および実機製作時にも試験	引張試験機、曲げ試験機、衝撃試験機、(クリアー)試験機、昇温用ヒータ等 水供給系(ポンプ、加工器)	FERでの冷却材(H ₂ O) 圧力: 1.0 MPa 動力炉での冷却材(H ₂ O, He) 圧力: 9~15 MPa
プラランケット容器内圧	容器壁(第一壁を含む) 応力分布、変形量	負荷圧力 各部歪量	歪量より応力値を算出	負荷圧力で0.2 ~1.5 MPa	全体モデル(ただし、実プラランケットの1/4~1/2の大きさ) 各試験体および実機製作時にも試験	水供給系ポンプ加工器) 空気供給系(コンプレッサ)	FERテストモジュールおよび動力炉用プラランケットの内圧: ~0.1 MPa 第一壁流路を模擬、内部補強板を備える。
熱応力試験 表面熱流束 (体積発熱)	第一壁 応力分布、変形量	温度分布 各部歪量 (入熱量)	歪量より応力値を算出	表面熱流束で ≤ 1.0 MW/m ² (定常熱負荷およびくり返し熱負荷を考慮) ディスラアブレーション時の熱負荷の照射	上記小部分モデルを使用	表面熱流束熱線冷却系	FERでの表面熱流束: 0.8 MW/m ² 動力炉での表面熱流束: ~0.9 MW/m ² ディスラアブレーション時熱流束: 140 MW/m ² x 15 msec (FER) 高熱負荷試験設備で実施
冷却管周囲熱抵抗層用 スペースサ管/増殖材層	プラランケット容器壁 内部補強板、冷却管管板、冷却管支持板等 応力分布、変形量 スペースサ管各部応力、変形量	温度分布 各部歪量 増殖材の破損の有無	歪量より応力値を算出	プラランケット内部での体積発熱等による温度上昇を模擬	上記出部分モデルおよび全体モデルの使用	冷却管、支持板、内部補強板等へのヒータ設置	くり返し負荷に伴う増殖材充減率の変化についてデータを得る 伝熱流動試験設備で実施
電磁力試験	第一壁 電磁力分布 応力分布 変形量 (第一壁冷却流路が電流分布、電磁力分布に及ぼす影響を検討)	電流分布 各部歪量 磁束密度 プララマ模擬電流の初期値、変化率	電流分布と磁束密度より電磁力を算出 歪量より応力値を算出	スペースサ管温度: ≥ 400 °C Li ₂ O温度(400~1000 °C)との差に基づき変位差を模擬する。 くり返し負荷を考慮	冷却管: 1~2本以上 高さ: ~50 cm 小モデル: ~10 cm	増殖材充減領域へのヒータ設置 冷却系 定常磁場コイル プララマ電流模擬装置 : ~500 kA 冷却系: H ₂ O, 170 t/h	構造強度の検証よりも、発生する渦電流分布、電磁力、発生応力等に関する解析コードの検証に重点をおいて考える。 プララマ電流の消滅時間に対するPERでの想定値: 15 msec

Table 2.3.3 Test items in integrity test facility (2/3)

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
圧力/熱重量試験	ブランケット容器壁電磁力分布 応力分布 変形量 (第1壁冷却流路、ブランケット容器内補強板等の影響を検討)	電流分布 各部重量 磁束密度 プラズママシニング初期値、変化率	電流分布と磁束密度より電磁力を算出 重量より応力値を算出	磁束密度： $\leq 1.5\text{ T}$ プラズママシニング時定数： $\geq 15\text{ msec}$	ブランケット構造を模倣するモデルを使用(実機の1/4~1/2の大きさ) シールド体を含まないもの、およびシールド体を模倣したものを考慮	定常磁場コイル プラズママシニング装置 冷却系： H_2O , 170 t/h ： $\sim 500\text{ kA}$	高熱負荷試験設備で実施
圧力/電磁力重量試験	応力分布、変形量 電磁力分布	負荷圧力 温度分布 入熱量 各部重量	重量より応力値を算出 電流分布と磁束密度より電磁力を算出	冷却流路に対する負荷圧力で $\leq 2.0\text{ MPa}$ 容器内圧としての負荷圧力で $\leq 0.5\text{ MPa}$ 表面熱流束で $\leq 1.0\text{ MW/m}^2$ および ディスプレイアンプ時の熱負荷の照射	ブランケット構造を模倣するモデルを使用(実機の1/4~1/2の大きさ)	冷却系 (ポンプ、加圧器) 空気供給系 (コンプレッッサ) 表面熱流束熱源	上記電磁力試験時に圧力を負荷することで実施
熱応力/電磁力重量試験	応力分布、変形量 電磁力分布 (温度分布に基づく電磁力分布に及ぼす影響を検討)	各部重量 温度分布 入熱量 電流分布 磁束密度 プラズママシニング初期値、変化率	重量より応力値を算出 電流分布と磁束密度より電磁力を算出	磁束密度： $\leq 1.5\text{ T}$ プラズママシニング時定数： $\geq 15\text{ msec}$ 容器内圧としての負荷圧力で $\leq 0.5\text{ MPa}$ 壁 通常運転時での第1壁 側 射撃、後壁等の温度を模倣	上記小部分モデルおよびブランケット全体モデル	熱源 (ヒータ) 用電源 冷却系 定常磁場コイル プラズママシニング装置 ： $\sim 500\text{ kA}$	上記電磁力試験時にヒータにより容器壁(とくに第一壁)を加熱することで実施

Table 2.3.3 Test items in integrity test facility (3/3)

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
溶融炉停炉	電磁力分布 溶融層移動挙動	電流分布 温度分布 各部歪量 磁束密度 プラズマ機械電流の初期値、変化率 入熱量	歪量より応力値を算出 これより電磁力を推定 また、電流分布と磁束密度より電磁力を算出 これらとの比較検討。メラウ高速ビデオ、カメラによる溶融層挙動の観察	磁束密度： $\leq 1.5\text{ T}$	上記小部分モデル あるいは平板	表面熱流束熱源 (冷印紙) 定常磁場コイル プラズマ電流模擬装置 ： $\sim 500\text{ kA}$	第1段階として、薄い液体金属層を用い、非加熱とする。 第2段階として、鉛等の比較的融点の低い金属を使用し、赤外線ヒータ、NBI等のできるだけ電磁石との相互影響のない熱源を使用する。
圧力/熱/ 電磁力連動試験	応力分布、変形量 電磁力分布	負荷圧力 温度分布、入熱量 各部歪量 電流分布 磁束密度 プラズマ機械電流の初期値、変化率	歪量より応力値を算出 電流分布と磁束密度より電磁力を算出	冷却流路に対する負荷 圧力で $\leq 2.0\text{ MPa}$ 容器内圧としての負荷 圧力で $\leq 0.5\text{ MPa}$ 磁束密度： $\leq 1.5\text{ T}$ プラズマ機械電流消滅 時定数： $\geq 15\text{ msec}$ 通常運転時での第一壁 側壁、後壁等の温度を 模擬	プランケット構造を模 擬するモデルを使用 (実機の1/4 \sim 1/2 の大きさ)	冷却系(ポンプ、加圧 器) 空気供給系(コンプレ ッッサ) 熱源(ヒータ)用電源 定常磁場コイル プラズマ電流模擬装置 ： $\sim 500\text{ kA}$	上記電磁力試験時に圧力負荷およびヒータによる容器壁(とくに第一壁)への加熱を加えることのできる実施

Table 2.3.4 Test items in fabrication technology development facility

試験項目	評価対象データ	取得(計測)データ	評価方法	必要データ範囲	試験体寸法	必要装置および仕様	備考
増殖材製造法 要素試験	小径ペブルの大量製造法 高純度、高密度	粒径, 歩留り 純度, 密度	測定データによる	粒径: < 1mm ^φ 純度: > 99% 密度: > 80%TD		造粒装置 焼結装置 (真空炉, CIP) 分析装置 (スペクトル 分析, 密度測定)	方法論のスクリーニング
システム実証試験	品質, コスト	同上				上記選定装置一式	品質管理, 安全管理, コスト低減の観点から システム向上の検討を行なう。
増殖材充填試験	充填率, 均一性	容量, 重量 充填分布	充填率は容量, 重量デ ータより算出。 均一性は目視法, X線 検査法等で確認。		1/4~1/2 スケール モデル	振動装置	
フランケット容器組立 要素試験	第一壁冷卻構造 接合, 容器同志接合 管一管板接合	接合条件, 接合率 金相, 強度データ 同上	非破壊, 破壊試験によ る 同上		テストピースサイズ 同上	HIP, TLP, 真空ろう 付, BBW 管一管板溶接装置	熱抵抗用スペースサの接合についても考慮す る。
	曲げ加工	曲げ角度, 曲げ半径 冷卻流路形状	金相試験による		同上	曲げ装置	
	拡散接合部 非破壊検査	欠陥識別度	金相試験による		同上	UT, RT	
容器試作	要素技術接合 検証, コスト評価				表スケール (但し, 長さ 1/2)	上記選定装置一式	

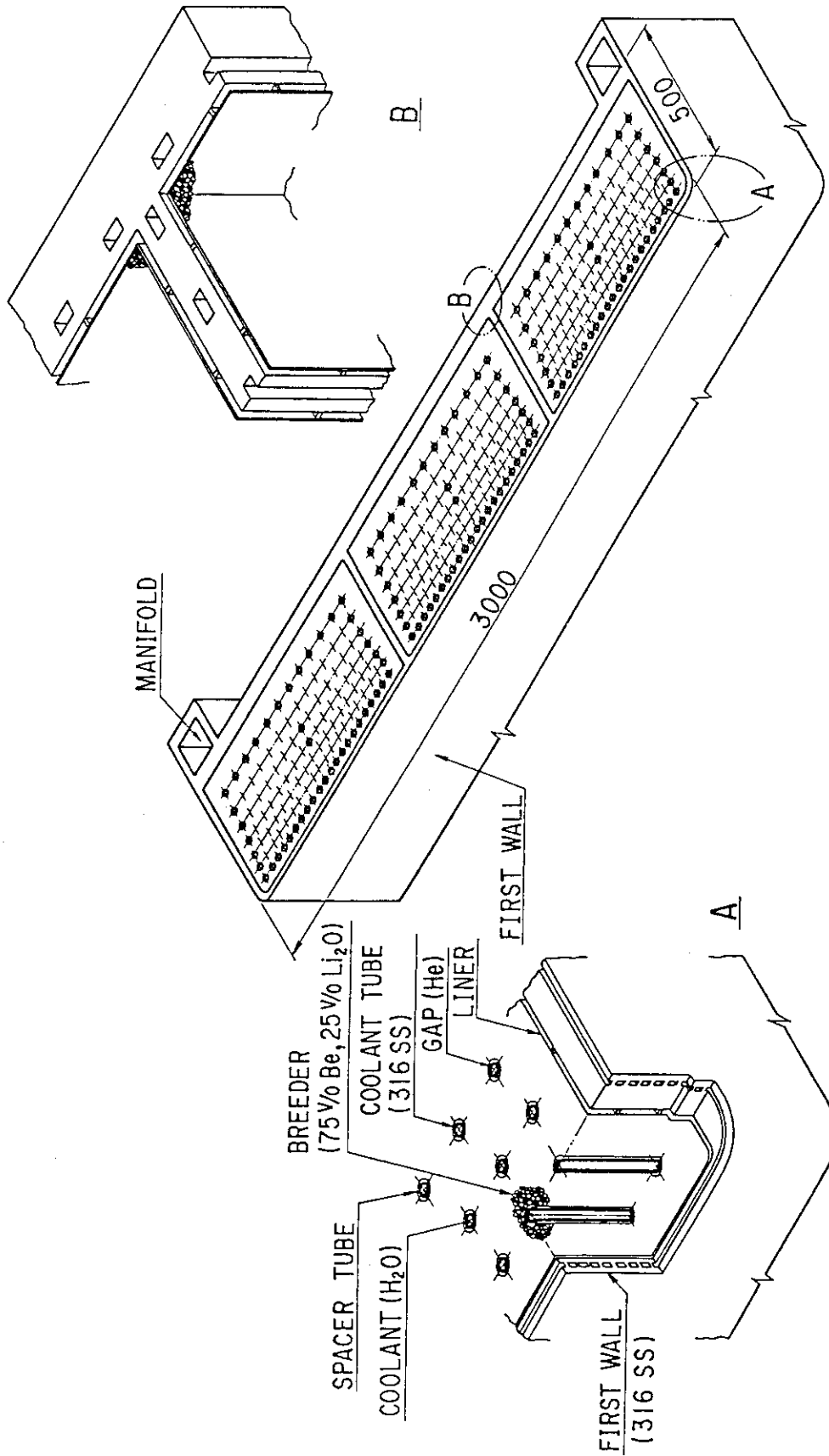


Fig. 2.1.1.1 Tritium breeding blanket -Li₂O/Be/H₂O/SS*-
 (* Austenitic Stainless Steel)

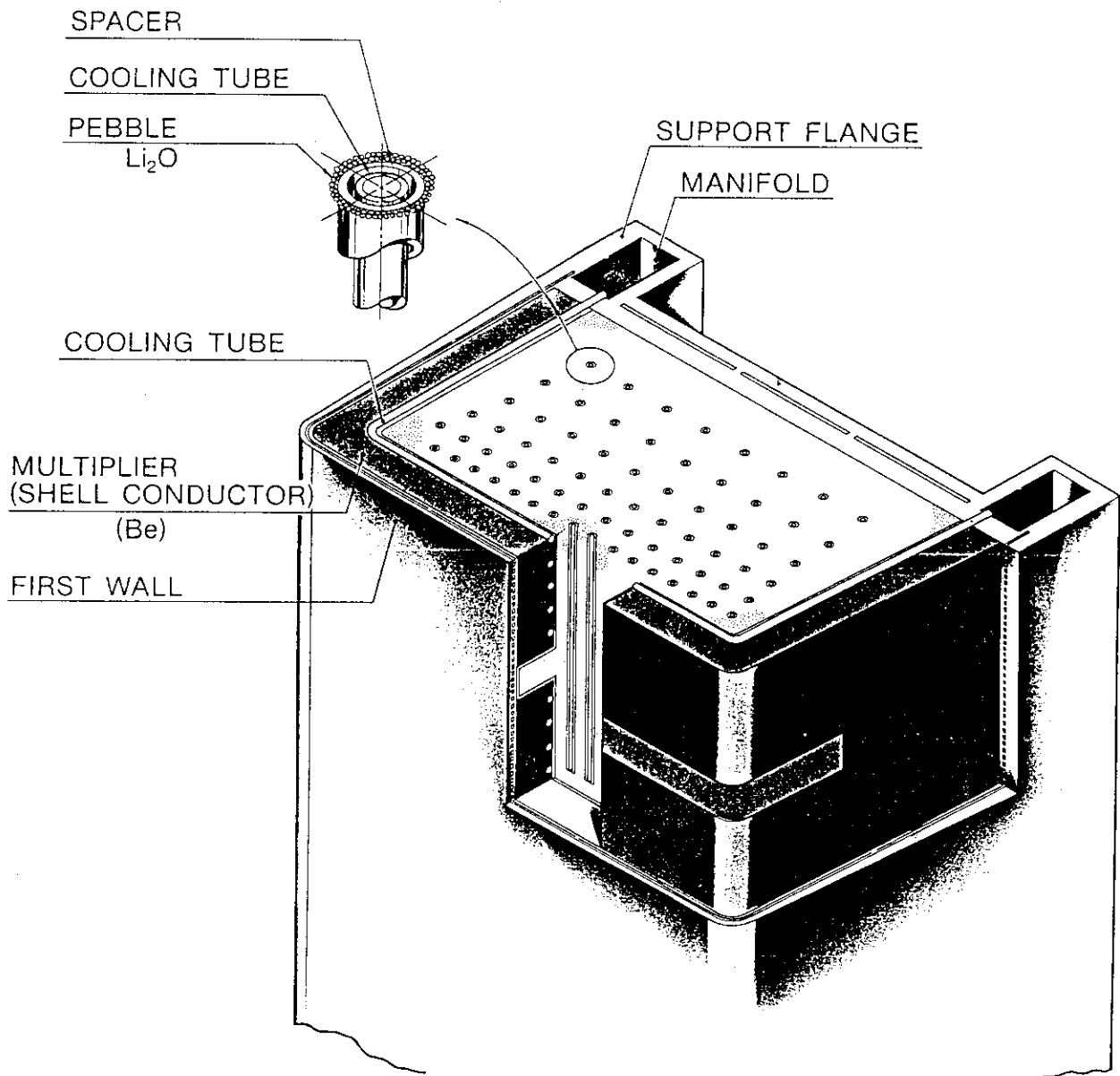


Fig. 2.1.2 Bird's-eye-view of the pebble-type blanket for FER²)

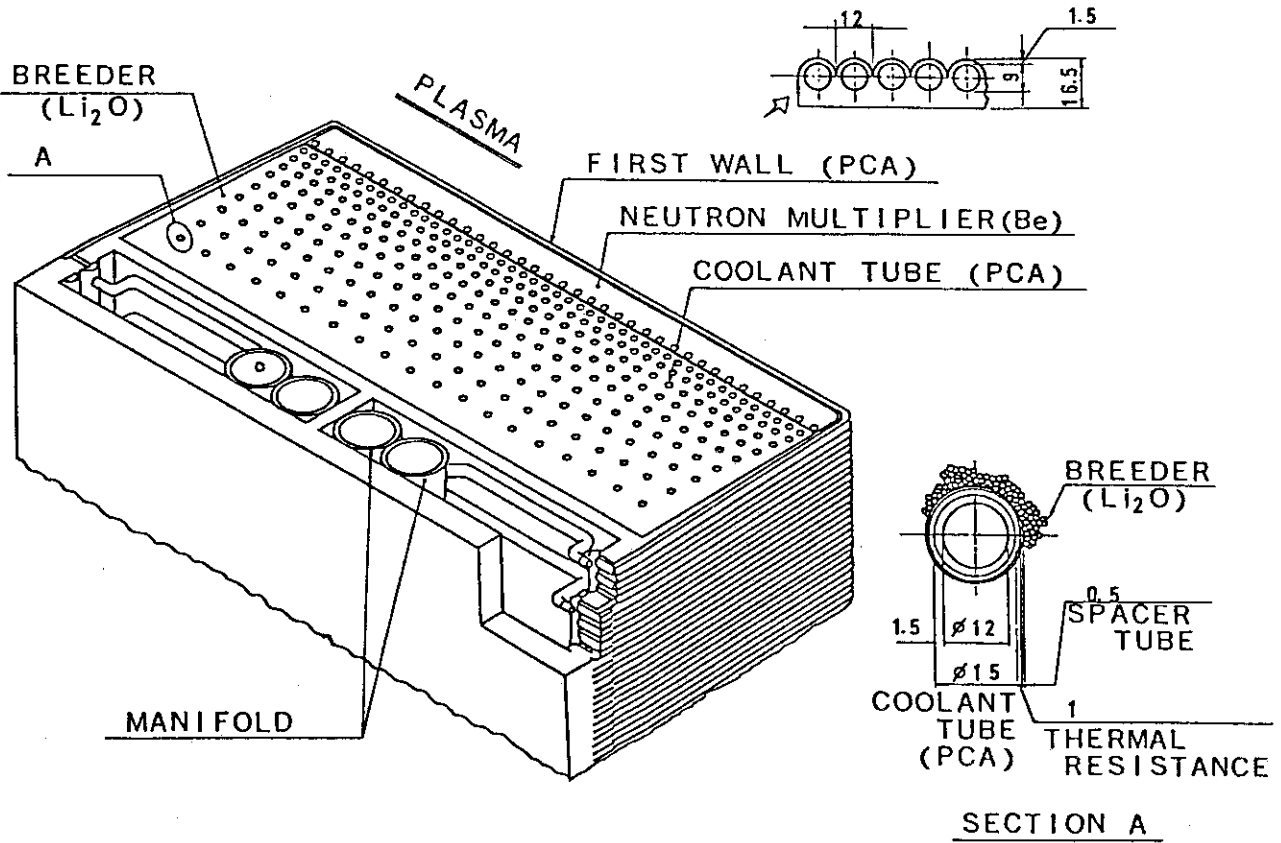


Fig. 2.1.3 PCA/Li₂O/H₂O/Be blanket for power reactor⁴⁾
 (Manifold ----- Coolant for first wall)

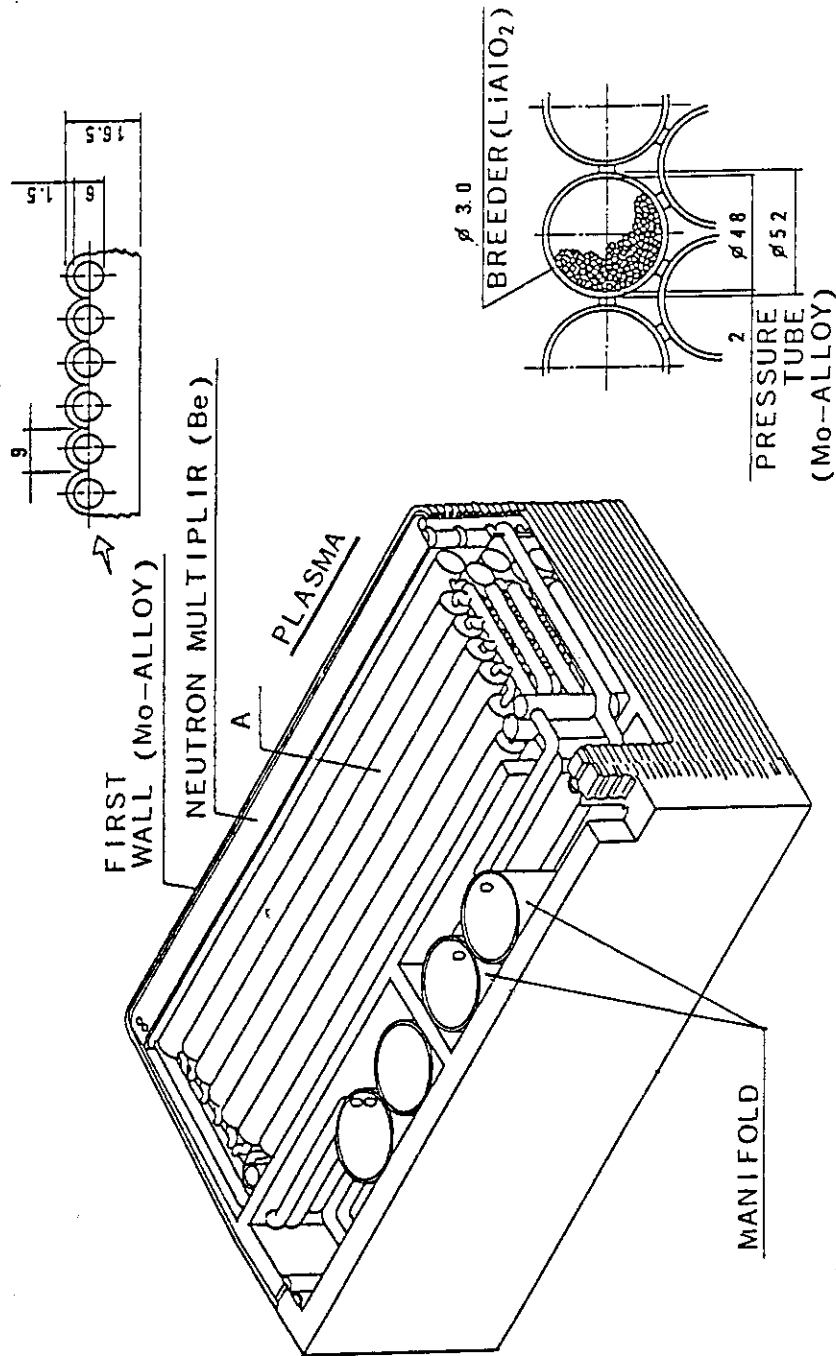


Fig. 2.1.4 Mo-alloy/LiAlO₂/He/Be blanket for power reactor⁴⁾
 (Manifold ----- Coolant for first wall and breeder zone)

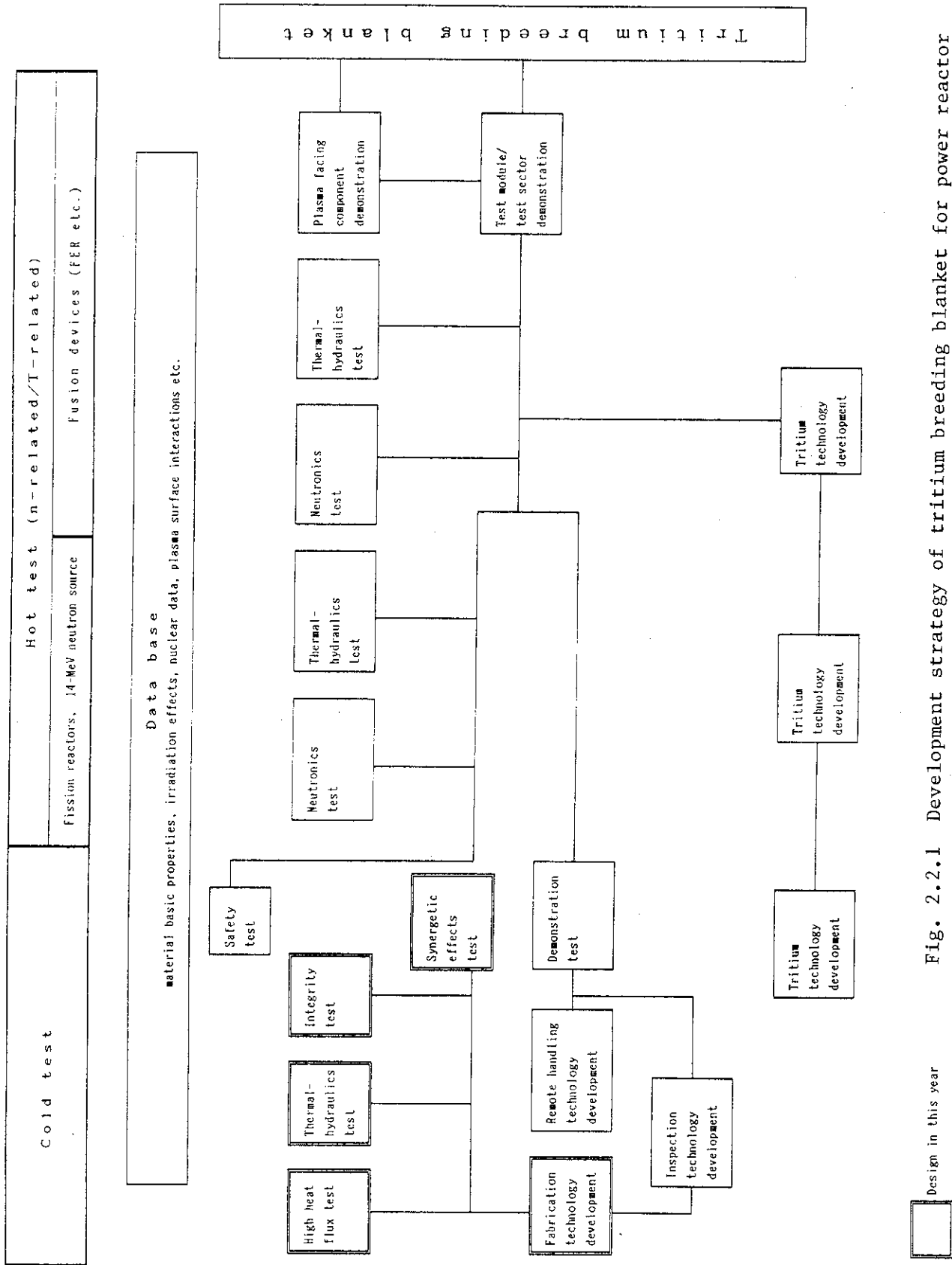


Fig. 2.2.1 Development strategy of tritium breeding blanket for power reactor

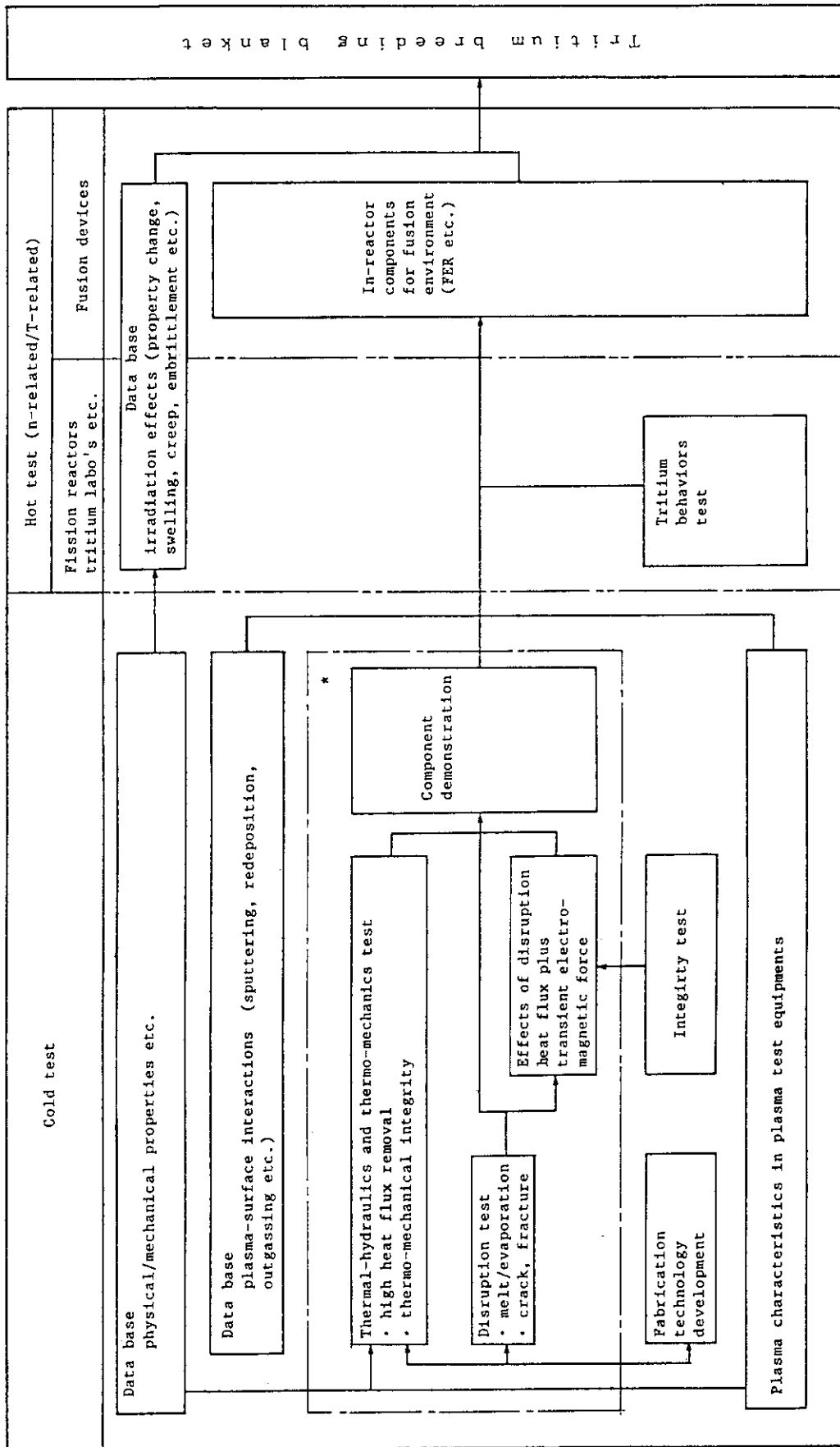
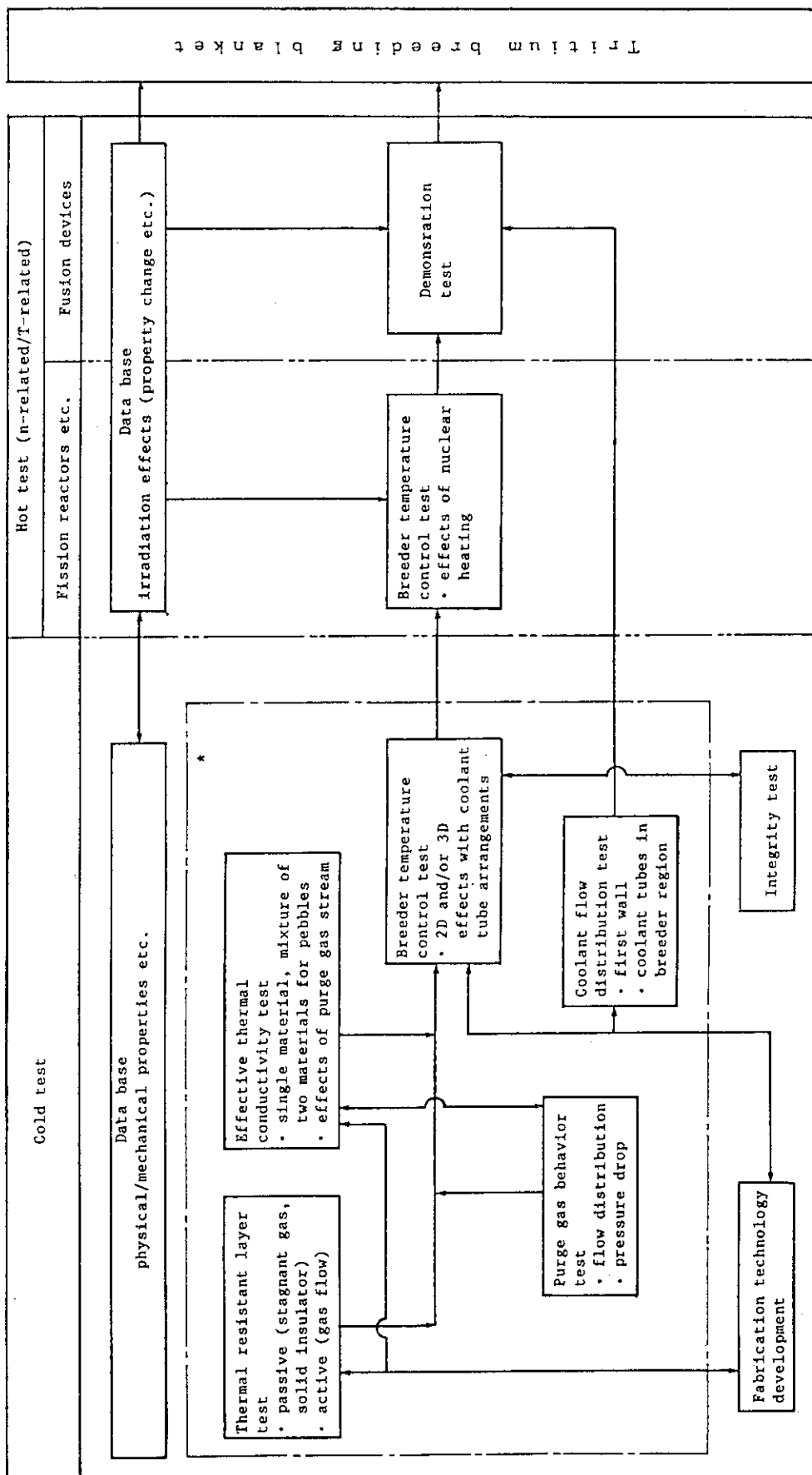
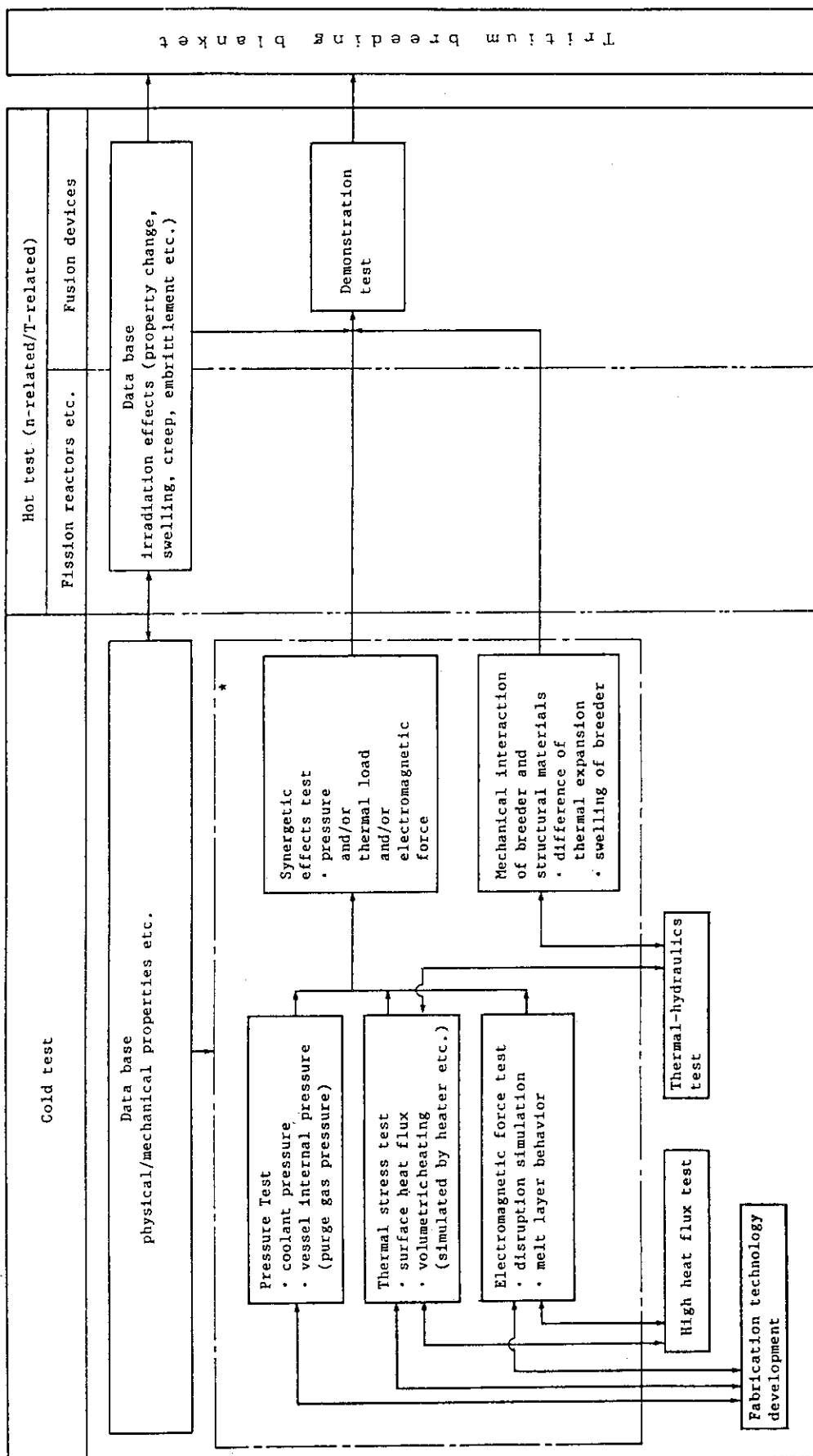


Fig. 2.2.2 High heat flux test scheme



* subjects for this design study

Fig. 2.2.3 Thermal-hydraulics test scheme for tritium breeding blanket



* subjects for this design study

Fig. 2.2.4 Integrity test scheme for tritium breeding blanket

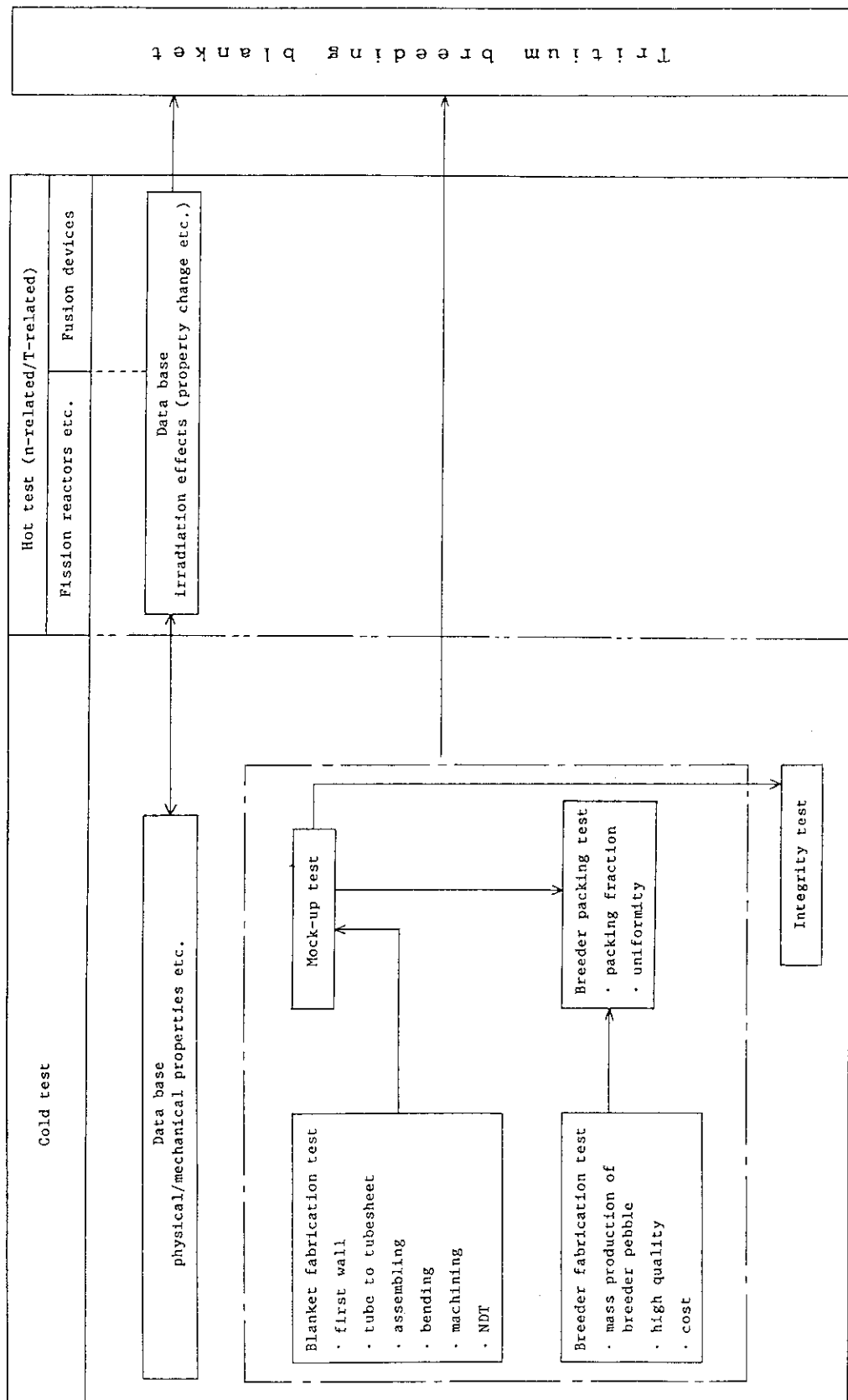


Fig. 2.2.5 Development scheme of fabrication technology for breeding blanket

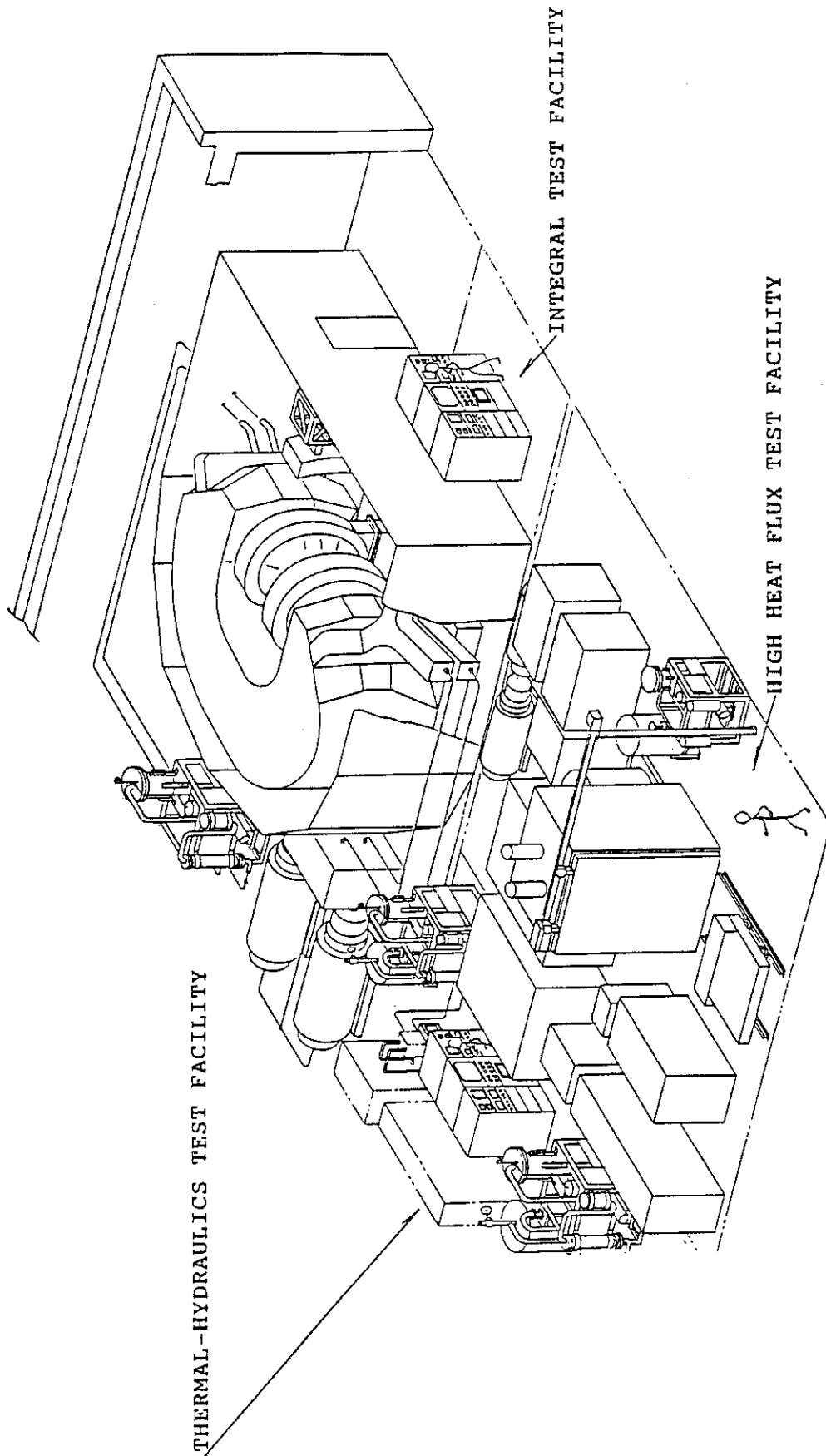


Fig. 2.3.1 Layout of breeding blanket development facilities-I
(High Heat Flux, Thermal-Hydraulics and Integrity Test Facilities)

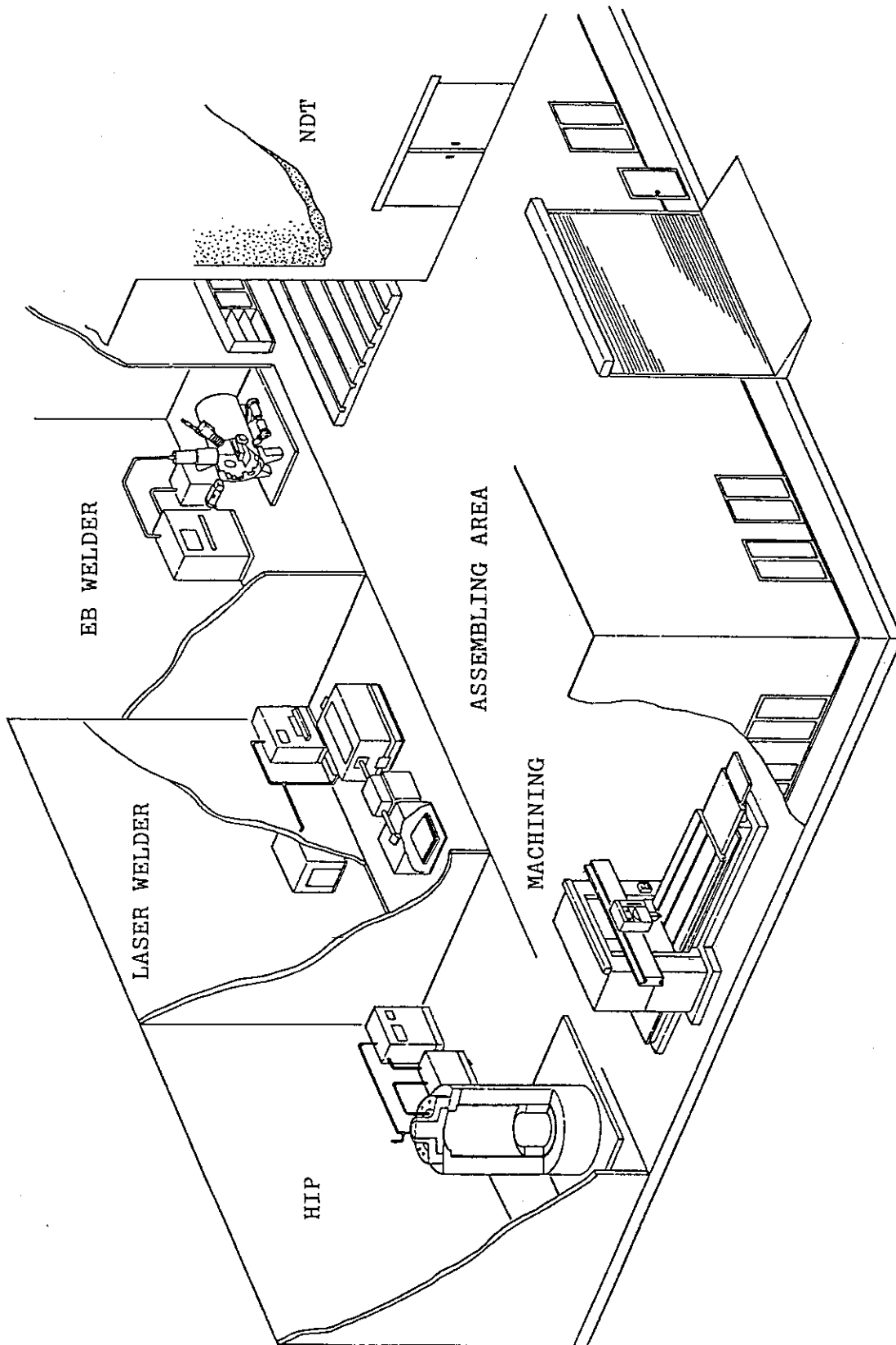


Fig. 2.3.2 Layout of breeding blanket development facilities-II
(Fabrication Technology Development Facility)

3. 設 備 設 計

3.1 高熱負荷試験設備

3.1.1 設備の目的

(1) 開発対象機器

本章で検討した高熱負荷試験設備 (High Heat Flux Test Facilities) は、表面に高熱流束を受ける高熱流束機器 (High Heat Flux Components) の開発を目的としている。核融合炉に必要とされる高熱流束機器は、プラズマに直面してプラズマからの熱/粒子負荷を受けるプラズマ対向機器 (Plasma Facing Components) と中性粒子入射装置用の NBI ビームダンプ等である。このうちプラズマ対向機器とは、いわゆる第 1 壁、プラズマ不純物制御用のダイバータ/リミタ、RF 用アンテナ等の総称であり、ブランケットと一体に設計される第 1 壁はもちろん、ダイバータ/リミタおよび RF 用アンテナ等の機能もブランケット設計に少なからず影響する。ここでは開発対象機器として主にプラズマ対向機器を考慮して検討する。ただし、本試験施設に設置した高熱流束模擬熱源を用いてビームダンプ等、同様の課題を有する他の高熱流束機器の開発を行うことも、十分可能である。

(2) プラズマ対向機器の受ける負荷と研究・開発課題

プラズマ対向機器 (第一壁およびダイバータ/リミタ) は Table 3.1.1 にまとめるような環境条件にあり、プラズマの通常運転時、およびディスラプション時に Figs. 3.1.1, 3.1.2 に示すような負荷を受ける。このような負荷を受けるプラズマ対向機器の研究・開発課題は、次のように大きく分類される。

- ① 高熱流束下での熱・構造特性および除熱特性の把握と健全性の実証。
- ② プラズマディスラプション時の熱負荷および電磁力に対する特性の把握と健全性の実証。
- ③ 基礎物性、特にプラズマ粒子と壁材料との相互作用特性 (スパッタリング, 再付着, 脱ガス等) の把握。
- ④ 製造技術 (アーマー基板の 2 層構造物の接合技術および容器組立技術) の確立。
- ⑤ トリチウム挙動 (保持, 透過等) の把握。
- ⑥ 構造材の中性子照射損傷データの取得。

これらのうち、本試験設備による研究・開発の対象となるのは、①および②の課題である。③はプラズマに接する表面材料の選定に当たって必要となる材料固有の基礎物性データに関連するものであり、④は他の試験設備 (製造技術開発設備) での検討項目である。また、⑤はトリチウムの取扱いが必要となること、⑥は中性子との相互作用に関わることから、いわゆるホット試験項目であり、今回の検討範囲外である。なお、JT-60, JFT 等の大型トカマクをはじめとするプラズマ試験装置を利用してプラズマ対向機器への熱/粒子負荷の大きさや分布を明らかにすること、試験施設を利用して取得された実験的データをもとに、より性能の良い機器の設計研究を進めることも機器開発上重要であろう。

1) 高熱流束の熱・構造特性および除熱特性

プラズマ対向機器は通常運転時においてプラズマからの放射等によって高い表面熱流束を受ける。ダイバータ板やリミタ板は高い熱流束を受けるため、機器の形状（セパトリクスとなす角度）やプラズマ物理上の工夫によって表面熱流束を設計可能な範囲に抑えることになるが、この値は通常 $2 \sim 5 \text{ MW/m}^2$ 程度である。熱負荷を受ける時間は実験炉以降には100 sec以上であり、構造材温度を制限温度以下に維持するためには、強制冷却が必要である。また、プラズマ側にスパッタリング対策あるいはプラズマへの不純物混入対策を目的としてアーマを設置する場合には、冶金的な2層接合構造が必要となる。

ところで、可能な限り高い熱流束を許容できるような技術を確立することは、プラズマ対向機器の設計を容易にし、設計の自由度を上げるばかりでなく、機器の寿命を確保するためにも有効である。このため、片面加熱時の熱伝達や沸騰・バーンアウト特性、流量配分等の熱・流動（除熱）特性や、熱疲労接合部の健全性等の熱・構造特性を把握することが重要である。このため、適切な表面熱流束模擬熱源と冷却材循環系統等を有する試験施設が必要とされる。

3.1.2 試験項目および試験条件

(1) 試験項目

1) 試験項目の概要

プラズマ対向機器の開発を進めていくためには、多様な研究・開発を行っていかねばならない。特に、プラズマディスラプション時の高熱流束に対する表面材料や接合部の挙動、通常運転時のダイバータ／リミタ板等への定常あるいは準定常的な高熱流束に対する熱・流動、熱・構造特性については、高熱流束模擬熱源を有する本試験設備を利用した要素試験が必要とされる。また、高熱流束と機械的応力（内圧、支持による拘束力 etc.）、あるいは電磁力（特にディスラプション時）とが同時に作用する場合の健全性、高熱流束がプラズマ壁相互作用や中性子と構造材との相互作用に与える影響に関する研究の一部も本試験設備（特に模擬熱源）を利用した実験研究を実施することが必要となろう。これらの研究項目を Table 3.1.2 に整理してまとめた。すなわち、熱流束のみの影響を明らかにする単一効果（Single Effects）試験、熱流束とそれ以外の負荷の複合的な影響を調べる複合効果（Multiple Effects）試験、および実機規模の部分あるいは全体モデルによる機器総合実証試験（Component Demonstration Test）に区分される。

単一効果試験はさらに、ディスラプション挙動要素試験と通常運転時挙動要素試験に分けられる。ディスラプション挙動要素試験は、ディスラプションによる短時間の高熱流束負荷に対する壁表面に関する知見を得ることを目的とするもので、壁表面材料の損耗量（溶融・蒸発、粒子放出等）、健全性（組織変化、き裂変化・進展等）、および接合部の熱サイクル疲労特性等のデータを取得する。一方、通常運転時挙動要素試験は、強制冷却による連続的な高熱流束の除去、およびこれによる応力等に関する知見を得ることを目的とするもので、片面から熱流束を受ける流路を流れる軽水の伝熱・流動特性（熱伝達率、沸騰、バーンアウト、圧力損失・変動、流量分布）、構造材の温度分布、ギャップコンダクタンス（機械接合

の場合)、および熱応力、熱サイクル被労に関するデータを取得する。

複合効果に関する実験としては、機械荷重と熱荷重を同時に作用させた場合の健全性を、通常運転時挙動要素試験の中で実施する。また、熱流束と非定常電磁力が同時に作用した場合の、壁表面熔融層の不安定性も、ディスラプション挙動要素試験の一項目である。しかし、電子ビーム等の荷電粒子ビーム熱源は電磁場が変動する場所では使えないことから、これに代わる模擬熱源が必要となる。これについては、健全性試験の節で検討を行う。

総合/機器実証試験としては、第1壁およびダイバータ/リミタ板の部分モデルを試作し、その特性を実証するための、部分モックアップ実証試験や、設計値を上回る過大な熱負荷を与えて限界性能や破損状態に関する知見を得るための過負荷試験が必要である。

これらの試験項目を、取得すべきデータとともに Table 2.3.1 にまとめた。

2) ディスラプション

プラズマが瞬時に崩壊するディスラプション時には、プラズマ対向機器は極めて高い表面熱流束と電磁力を短時間に受ける。ディスラプション時にこれらの機器が受ける熱負荷は、実験炉の場合、最も厳しい個所で $2 \sim 3 \text{ MJ/m}^2$ (負荷時間が $0.1 \sim 20 \text{ ms}$) と予測されているが、熱負荷の空間分布や負荷時間については、不確定性が大きい。現存する各種のプラズマ試験装置 (JT-60, JET etc.) によるディスラプション特性のより正確な把握と、可能な限り幅広い条件での実験データの蓄積が期待されるゆえんである。把握すべきデータとして、高熱流束による壁表面材料の熔融・蒸発挙動、熱応力、き裂の発生・進展挙動等があり、ディスラプション時の応答の速い高熱流束を模擬できる熱源を有する高熱負荷試験施設による実験が実施される。また、電磁力により発生する応力やこれに対する機器の健全性、支持法の検討、熱負荷と電磁力が重畳して作用した場合の熔融金属の安定性 (移動現象)、熱+電磁衝撃応力の影響についても実験による研究が必要とされる。ただし、この模擬熱源として想定される荷電粒子 (電子, イオン) ビームは、電磁場により影響を受けるため、電磁力との重畳作用効果については別の熱源を有する施設 (健全性試験施設の章で検討) を利用することになる。

3) プラズマ粒子と壁表面材料との相互作用 (PSI 特性)

プラズマ対向機器はプラズマに直接面し、プラズマからのイオンが入射して表面材料との相互作用を生じる。把握すべき特性としては、物理/化学スパッタリングによる材料損耗や表面変質特性、脱ガス特性等、主として材料に依存する基礎物性データである。この分野の研究は、原研、大学、国内外の研究所等で幅広く展開されており、例えば単体物質に入射する単色エネルギーイオンによる物理スパッタリング率に関しては西独 IPP の実験データを基にしたモデル等によってかなり正確に予測できるようになっている。今後の課題としては、高粒子フルエンスでの特性や複雑な体系 (化合物、入射粒子エネルギーの分布 etc.) でのデータの取得が望まれる。

4) 製造技術の確立

プラズマ対向機器は厳しい環境下で使用されることから複雑な構造となる。すなわち、プラズマ側で PSI 特性や耐熱衝撃特性の良いものが望まれ、一方、冷却側では除熱性能や構造強度特性の優れたものが要求されるというように、多様な機能が必要とされるため、2層あ

るいは3層以上の多層構造物とされる場合が多い。このため、高熱流束負荷に耐えるような接合技術の確立、ブランケットとの組立技術の確立等が重要である。製造技術開発設備については3.4節にて述べる。

5) トリチウム挙動

トリチウムは放射性物質であり、安全性の観点上重要な因子であること、PSIに関する実績や実験データが非常に少ない等の理由から、今後の研究が急がれる課題として認識されている。冷却材へのトリチウム透過量や構造材中インベントリを評価するために、トリチウム粒子のインプラネーションや壁表面での再結合、構造中の輸送挙動等を把握しておかねばならない。また、これらの挙動に高熱流束や高速中性子照射等の負荷が及ぼす影響も重要な検討課題であろう。

6) 中性子照射損傷

高熱流束機器を構成する材料は核融合炉環境で使用すると高速中性子の重照射による損傷を受け、熱/機械的物性値の変化や寸法変化等が起こる。現在のところ、十分な照射量が得られる核融合中性子源が存在しないことから、核分裂炉を利用した重照射データ取得と、14 MeV中性子源によるメカニズムの解明を並行して進め、その相関性を考察する方法がとられている。

(2) 試験条件

1) 熱流束および熱負荷時間

模擬すべき表面熱流束の値を明らかにするため、実験炉規模 (FER¹⁾, INTOR²⁾, FED) および実用動力炉規模 (原研実用炉³⁾, STARFIRE⁴⁾, MUWMAK等) のトカマク炉の設計例から第1壁およびダイバータ/リミタ表面の熱流束を調査し、比較表をTable 3.1.3にまとめた。またFERとINTORに関してプラズマディスラプションのパラメータをTable 3.1.4に整理して示した。

(i) 通常運転時

FERやINTORにおける通常運転時の第1壁表面熱流束は一般に 0.1 MW/m^2 を多少上回る程度である。これはプラズマを自己点火条件とした場合プラズマから第1壁への放射熱流束が約 0.1 MW/m^2 となるためである。FEDはプラズマが自己点火条件に達しないので、熱流束の値は小さい。しかしながら、自己点火条件を達成することは実験炉の主要な目的の一つとして考えられるので実験炉規模の第1壁の表面熱流束は $0.1 \sim 0.2 \text{ MW/m}^2$ になると考えられる。また、ダイバータプラズマからの輻射熱やプラズマから流出する α 粒子による熱負荷を選択的に受ける領域では $0.3 \sim 1 \text{ MW/m}^2$ の熱流束となる可能性がある。ただし、これはプラズマの特性とも関連して不確定性が大きい。

さらに実験炉の第1壁では、壁の肉厚が大きいので、中性子による核発熱の寄与を無視することができない。すなわち、中性子壁負荷が 1 MW/m^2 程度の実験炉では核発熱率が約 10 MW/m^3 となり、肉厚が 10 mm 程度であることから表面熱流束と同程度の熱負荷となる。したがって、模擬実験では、体積発熱分を考慮した実験も必要となろう。

ダイバータ/リミタ表面では極めて大きなピークを持つ熱負荷を受け、セパトリスに垂直な面での最大熱流束は数 $\text{MW/m}^2 \sim 10 \text{ MW/m}^2$ に達する。設計に当たってはいずれの

場合もセパトリスに対する角度をとり、熱流束の低減化を図っている。これによりダイバータ／リミタ表面の最大熱流束は2～5 MW/m²となる。

実用動力炉では核融合反応により発生する α 粒子のエネルギーがほぼ全て放射熱流束として第1壁に負荷される。また中性子壁負荷が実験炉の場合の3～4倍となるので、第1壁の表面熱流束は一般に1 MW/m²前後となる。核発熱は実験炉の場合に比べてその割合が小さくなる。すなわち、発熱率は30 MW/m³～40 MW/m³となるが、熱・構造の観点から壁厚さが2 mm程度に制限されるので、核発熱による熱負荷は表面熱流束の数%である。熱負荷時間すなわちプラズマ燃焼時間は実験炉で100 s～1000 s、実用炉では定常運転とする設計が一般的である。強制冷却されるプラズマ対向機器は数10 s以上の熱負荷を受ければ定常状態となると考えられる。

(ii) ディスラプション

ディスラプションに関しては不確定性が大きい。第1壁が最大の熱負荷を受けるのはメイジャープラズマディスラプション(Major Plasma Disruption)中の電流クエンチ時である。実験炉では照射時間、すなわちプラズマ電流の減衰時間は5 ms～20 msであり、熱流束はピーキングを考慮して80 MW/m²～340 MW/m²と予想されている。しかし、INTOR会議等ではより短い熱負荷時間、より高い熱流束の条件も可能性のあるケースとして検討された⁶⁾。また、プラズマ電流の上昇(低物理リスク炉)や集中的にディスラプションエネルギーを受けるガードリミタの採用等によって約700 MW/m²の熱流束を受けるというシナリオも想定されている⁷⁾。

ダイバータ／リミタがディスラプション時に受ける熱流束については、第1壁の場合同様不確定性が大きい。照射時間は5 ms～20 ms、最大熱流束は115 MW/m²～1000 MW/m²と予想されている。ダイバータ／リミタ表面への熱負荷が最大となるのは、電流クエンチに先立つ熱クエンチ時であり、制御が比較的困難と言われている。このため、熱負荷時間が、約0.1 msになるという見方もある⁶⁾。

実用動力炉のディスラプションに関しては実験炉の場合以上に不確定性が大きい。ディスラプション時間が25 ms～100 ms、最大熱流束が約40 MW/m²～約150 MW/m²と予想されている。しかしながら、これについては今後の研究によって変更される可能性が大きい。またソフトランディング(ディスラプション時に緩やかにプラズマを停止させる)等のディスラプション制御の研究は進められるべきであるとも考えられている。

また、ディスラプション模擬実験では、材料特性に関する材料選定試験も実施されると考えられることから、十分な吸収エネルギーを与えるために、1～2 s程度の熱負荷時間での実験も要求されよう。

以上より、本試験設備で必要とされる熱流束および熱負荷時間は、Table 2.3.1にまとめられたように、ディスラプション挙動要素試験では、数10 MW/m²～数100 MW/m²×1 ms～数s、通常運転時挙動要素試験では、0.5 MW/m²～数MW/m²×数10 s以上(定常)と考えられる。

Fig. 3.1.3にFER⁵⁾およびINTOR⁶⁾のシナリオに対する熱負荷条件を既存の試験設備(60 kW EB⁷⁾、NBI原型ユニット)での実験条件をまとめて示した。図より、エネルギー密

度はほぼ 10 MJ/m^2 前後となっている。概存の試験設備における実験条件は、出力の制約と、時間制御の困難さから比較的加熱時間が長い。しかし、ディスラプションシナリオは、加熱時間が短く ($0.1 \sim 1 \text{ ms}$)、熱流束の大きい方向に見直される傾向があり⁶⁾、このような範囲の実験が実施されていないことがわかる。

2) 試験体寸法/熱負荷面積

プラズマ対向機器の熱負荷試験は、機器の一部を模擬した部分モデルあるいは機器のサイズを小型にした縮小モデルの試験体を用いて実施される。ここでは、プラズマ対向機器の研究・開発を実施するうえで、妥当な試験体寸法および加熱面積について検討を行った。

(i) 通常運転時

通常運転時の熱負荷を模擬した実験として、除熱特性に関する実験と熱・構造特性に関するものがある。まず、除熱特性を明らかにする場合には、実験領域(加熱部)が速度助走区間内にあることが望まれる。管入口から完全な乱流が存在する場合の、乱流速度助走区間に関する代表的な計算結果は、Fig. 3.1.4⁸⁾の通りである。Deissler は、流路の等価直径 D に対する助走区間長さ Le の比 Le/D は 10 以下であろうとしている⁸⁾。これより、試験体の乱流助走区間の長さは $Le/D = 10 \sim 20$ 程度とするのが妥当であろう。

一方、FER 第 1 壁およびダイバータ流路の等価直径は $10 \sim 20 \text{ mm}$ 程度であることから、最大約 400 mm の速度助走区間が必要となる。速度分布の発達した領域で熱・流動実験を実施するためには少なくとも速度助走区間の 2～3 倍以上の冷却流路長が望まれるため、試験体長は約 1000 mm 以上が要求される。また、冷却流路は端部流路の影響を避けること、並行流路における流量配分や流路閉塞の実験を行うことから、少なくとも数～10 チャンネルを有する試験体が必要である。すなわち、ダイバータ板 (25 mm) やガードリミタ (80 mm) のチャンネル幅から、必要な試験体幅は約 300 mm 以上であり、この全領域に一律な熱負荷を与えることが要求される。すなわち、試験体寸法として、約 $1000 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、熱負荷面積として、約 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ が必要である。

熱・構造特性に関する試験を行う場合は、構造物の構造に起因する応力、例えば機械的応力や第 1 壁と後壁との温度差による熱応力を模擬するために、トロイダル方向に少なくとも $1/2$ モジュール以上が必要とされる。また、ポロイダル方向には熱・流動特性を確保するために前述の理由から約 1 m の流路長が適当である。ブランケットは、モジュール幅が $1 \sim 3 \text{ m}$ であることから試験体寸法は約 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 以上でこの全表面に熱流束を与えることが要求される。ダイバータ板は、モジュール幅が 1.4 m 程度であり、後壁との熱応力等の問題がないことから、トロイダル方向の試験体幅は約 0.5 m でよいと考えられる。

実証試験用部分モックアップ試験体は、第 1 壁の $1/3$ 部分モックアップ程度、ダイバータではほぼ実規模相当の試験体での試験が必要である。

(ii) ディスラプション

最近の設計においては第 1 壁、ダイバータ/リミタともにプラズマ側表面にグラファイト等のアーマを設ける例が多い。このアーマはディスラプション時に発生する電磁力を抑制することと、アーマの接合を容易にすることから、幅数 10 mm のタイル状とするのが一般的である。ディスラプション時の熱負荷に対するアーマ材の健全性を実証するためには、少くと

も1枚のアーマタイル幅に、熱負荷を与えられることが必要である。

また、金属第1壁の場合は3つ以上の冷却流路に熱負荷を与え、流路部と流路間構造材(リップ等)、特に接合部の健全性を示すことが必要となる。金属第1壁、流路のピッチは約10 mm以下であることから、この場合にも必要とされる熱負荷領域幅は約30 mmと考えられる。

一方、熱負荷領域の長さは少くとも熱負荷領域の中央で端部への熱逃げの影響がないことが要求されることから、熱拡散距離($\sqrt{2at}$)の2倍以上でなければならない。ここで、 a : 熱拡散率、 t : 時間である。例えば1 s後の熱拡散距離は各材質について以下のようなものである。ただし、各材質の物質値は代表温度($(T_n + T_o)/2$ 、 T_m : 融点(K)、 T_o : 初期温度(300 K))の値を用いた。グラファイトでは2000 Kの値とした。

316 ステンレス鋼	3.2 mm
グラファイト (IG-110)	5.2 mm
タングステン	9.3 mm
アルミニウム	12.8 mm

すなわち、全ての材質に対して熱負荷領域の長さを約25 mm以上とすれば、中央では平面方向の熱伝導の影響がなく、1次元的な取り扱いができるようになる。このため、熱負荷面積は約30 mm × 30 mm以上とすることが適当と考えられる。

試験体寸法としては部分的に熱負荷を受けた場合の周囲の構造物による拘束の影響等も考慮して少なくとも長さを約100 mm以上とする必要があろう。

以上の検討結果から、熱源出力は、ディスラプション挙動要素試験および通常運転時挙動要素試験の一部(熱・流動特性試験等)について約100 kW以上、部分モックアップ実証試験を含む通常運転時挙動試験用として数MWが必要となる。これらの検討結果をTable 2.3.1にまとめた。これらの設備での実験条件(熱流束、熱負荷面積)の範囲を、現存設備での実験条件とともにFig. 3.1.5に示した。

3.1.3 主要機器・系統設計

(1) 概要

高熱負荷試験施設(High Heat Flux Test Facilities)はプラズマからの高熱流束を模擬できる熱源を有し、高熱流束機器(第1壁、ダイバータ/リミタ、RFアンテナ等を総称)の研究・開発を目的とするものである。このような施設として、熱源の出力は比較的小さい(100~200 kW)が、ディスラプション時の熱流束を模擬できること、熱流束の条件(強度、空間分布、時間応答等)を精度良く制御できること、使用が比較的簡便であることなどの特徴を有するディスラプション熱負荷試験施設(HHFTF-1)と、大出力の熱源(>1 MW)で実機用機器の実証試験も可能な大面積高熱負荷試験施設(HHFTF-2)が必要と考えられる。ここでは、特に早急に施設の設置が望まれるHHFTF-1の概略仕様(案)を中心にまとめた。

(2) 要求性能

① 約10 cm²(アーマタイル1枚程度)以上の面積に、約100 MW/m²以上の熱流束を与えられること。

→有効出力 100 kW 以上。

- ② 実機第 1 壁モジュールを模擬できる大きさの試験体 (約 1 m × 1 m × 0.5 m) を設置できること。

→真空チャンバサイズ約 2 m × 2 m × 2 m 以上。

- ③ 熱流束の条件 (強度, 空間分布, 時間応答) を精度良く制御可能で, ディスラプション時の応答の早い高熱流束を模擬できること。

→高速ラスタリング電子ビーム。

- ④ 使用が比較的簡便であること。

(3) 設備の特徴

1) 熱源

高熱負荷試験設備用熱源として, Table 3.1.5 にまとめるような種類があり, それぞれ長所と短所を有している。このうち, 電子ビーム (EB) およびイオンビームがディスラプション時の高熱流束を模擬する熱源として有望とされている。しかし, 制御性が良く熱負荷条件を精度良く設定できること, 使用が簡便で幅広い実験条件でのスクリーニング試験に対応できること, 等から, 改良型電子銃を熱源として利用することが適当と考えられる。本設備の最大出力は, 約 200 kW とした。従来利用されている EB 溶接装置の最大出力は約 100 kW である。このため, 既存の電子銃の技術で対応しながら十分高い出力を得ること, 高速ラスタリング時に十分広い加熱面積をとれるようにすることから, マルチガン (複数電子銃) 方式を代表案として採用している。当面は 2 本の電子銃を設置するが, 将来的な電子銃の増設あるいはイオン銃の新設に対応できる設計としている。電子銃の制御系, 電源系は共通利用できることで, 合理化が可能である。代替案として 200 kW 以上の電子銃開発も考えることができる。

電子銃は飛散物質の侵入によるアーキング停止を抑制するために, ビーム照射方向に対して角度をもたせること, 磁気トラップを設けること等の構造的工夫をしている。ビーム照射位置 (ターゲット位置) の設定と熱照射前後の試験体表面観察用として, 電子銃に CCD ビデオカメラを設置している。

2) 熱負荷制御系

各電子銃に, ディスラプション模擬熱流束の時間・空間分布の一様化を図るための高速ラスタリングシステムが設置される⁷⁾。また, ビームを高速ラスタリング (約 500 kHz) すると振幅が限定され (最大約 4°), 熱負荷面積が制約を受けることから, 通常時の熱流束模擬時に十分な熱負荷面積を確保するために低速ラスタリングシステム (約 500 Hz, 最大振幅約 25°) が設置される。さらに, 加熱位置の調節と時間制御用として静的ビーム偏向システムを設置する。ただし, 低速ラスタリングコイルと静的偏向コイルは兼用としている。

ディスラプション模擬時に, 熱流束の立ち上げ, 立ち下げ, および熱負荷持続時間の制御のために, 熱負荷時間制御装置を設置する。電子銃により発生するビームが安定するまでに約 0.5 秒の時間を要するため, 機械的なビームシャッター方式を採用している。

3) 真空チャンバ

最大の試験体寸法 (1 m × 1 m) に対応できること, 熱負荷面積を確保するために十分な

ワーク距離がとれることを考慮して、内寸を $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}^{\text{H}}$ とする。

4) 観察測定機器

ディスプレイ時の応答の早い表面挙動を観察するために、高速度ビデオシステムおよび高速度カメラシステムを設置している。また、試験体表面温度の測定のために、低温用ならびに高温用のパイロメータを設置している。

5) 軽水循環ループ

伝熱・流動試験，制御冷却第1壁モックアップを用いた実証試験，試験体の初期温度設定等の目的で，加圧・加熱軽水循環ループを設置している。

6) その他

各種データ（ビーム条件，ラスタリング条件，計測結果等）はCRT表示されるものとする。また，各種計測データ（電流，温度，ひずみ等）はデータ処理・監視盤にてオンライン処理可能となるように配慮している。

真空チャンバ下部には，試験体を表面内で移動できる試験ステージを設ける。

(4) 設備仕様

本設備は，真空室内に試験体を収納して熱照射を行うタンデム型ビーム照射装置であり，これに付属する電源系，排気系，ビーム制御系，軽水循環系，測定系等を含む。設備の概要をFig. 3.1.6に示した。また，主仕様を以下に示した。

- ① 電子ビーム出力：110 kW (180 kV, 610 mA 最大出力) × 2基
75 kW (150 kV, 500 mA 連続定格) × 2基
- ② 電子加速電圧：75 kV - 180 kV
- ③ 電子ビーム電流：(4 mA - 610 mA) × 2 (180 kV 時)
ビーム電流は0 mAから調整可能
- ④ 電子銃取付方向：下向
- ⑤ 真空室内寸法：2000(X) × 2000(Y) × 3000(Z) mm
- ⑥ 到達真空度：電子銃コラム： 1×10^{-5} Torr 以上
真空室： 1×10^{-4} Torr 以上

本装置は，つぎに示す各部より構成される。

- ① 電子銃コラム 2 式
- ② 真空室 1 式
- ③ 排気装置 1 式
- ④ 治具 1 式
- ⑤ 高圧電源装置 2 式
- ⑥ 制御装置 1 式
- ⑦ 計測装置 1 式
- ⑧ 軽水循環装置 1 式
- ⑨ その他の装置 1 式

参考文献

- 1) 炉設計研究室, 核融合実験炉(FER)の概念設計(昭和58年度報告書), JAERI-M 84-212(1985)
- 2) IAEA, International Tokamak Reactor Phase One, (1982)
- 3) 東稔達三ほか, 核融合動力炉ブランケット・システムの技術的検討, JAERI-M 87-017(1987)
- 4) Baker, C.C. et al., STARFIRE-A Commercial Tokamak Fusion Power Plant Study, ANL/FPP-80-2(1980)
- 5) FER設計チーム炉本体設計グループ, 私信(1988)
- 6) INTOR Japan team, Report for Session XV(1987)
- 7) Seki, M. et al., Improvement of an Electron Beam Facility as a Heat Source for Disruption Simulation Experiments, Fusion Eng'ing Des. 5(1987), 215
- 8) 日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第3版(1975), 23

3.2 伝熱・流動試験設備

3.2.1 設備の目的

本設備は, Fig. 2.2.3中の一点鎖線内に示した増殖ブランケットの増殖材充填領域における伝熱・流動, とくに増殖材の温度制御に関する試験を行うものである。

3.2.2 試験項目および試験条件

本試験設備による試験項目および概略試験条件を Table 2.3.1 に示した。試験項目としては, Fig. 2.2.3中でコールド試験として示す冷却管/容器壁周囲熱抵抗層試験, 増殖材充填領域有効熱伝導率試験, パージガス流動試験, 冷却材流量配分試験およびこれらの総合試験としての増殖材温度制御試験の5つを考えた。試験体規模および試験方法を Table 3.2.1 に示す。一般に伝熱・流動特性を把握するための試験装置としては, 機器全体を模擬するのではなく構造の一部を取り出した部分モデルを用いることがよく行われる。本試験設備においても, できるだけ実機の熱負荷条件等を模擬できるように考慮した実寸法モデルを検討した。

(1) 熱抵抗層特性試験

本試験は, 増殖材の最低温度を維持するために必要となる冷却管周囲および容器壁周囲の熱抵抗層の特性を調べるものである。ここでは, 熱抵抗層を設置した冷却管の短管および平板(容器壁を模擬)等の小試験片を用いた基礎的試験を行う。冷却管内面および平板への熱流束としては, FERテストモジュール¹⁾および動力炉用増殖ブランケット²⁾の増殖材充填領域と同等の条件および若干大きめの条件に対しても試験できるものとした。

(2) 増殖領域有効熱伝導率試験

本試験は, ブランケット内における増殖材温度制御に対して必要となるペブル増殖材充填領域の有効熱伝導率を測定するものである。本試験では, 試験体全体をできるだけ一様温度に保

持し、その温度を変えることによって有効熱伝導率の温度依存性を調べる。熱流束の試験範囲としては上記の熱抵抗層特性試験と同等の条件まで行うものとする。これによって実機内での増殖材充填領域温度分布およびそれが有効熱伝導率に及ぼす影響を評価するための基礎データを得る。また、ペブル充填層内に存在するパージガスおよびその流動が有効熱伝導率に及ぼす影響についても検討する。

(3) パージガス流動試験

本試験では、ペブル充填層内でのガスの流動状況を観察すると共に、充填層を流れるガスの圧力損失評価を行う。ブランケットにおけるパージガスの流速は非常に遅く、従来の設計例³⁾においては数 cm/s ～数 10 cm/s のオーダーである。これより、まず充填層内をできるだけ一様温度に保持した基礎データを取ると共に、充填層内に温度分布を生じさせることによるガスの自然対流についても調べることにする。

また、動力炉等においてはガスにより増殖材ペブルを直接冷却する概念も提案されている²⁾。この設計例ではペブル充填層内のガス流束が～8 m/s となっており、本設備でも同程度の試験が行えるよう計画する。

(4) 冷却材流量配分試験

本試験では、並列多チャンネルとなる第一壁冷却流路および増殖材充填領域冷却管での冷却材流量配分特性を調べる。試験体としては実機の冷却流路全長を模擬するが、全流路本数を設ける必要はなく代表的流路（例えば、増殖材充填領域冷却管に対しては第一壁側および中央部、後壁側部分に相当するもの）数本を設置することとする。

(5) 増殖材温度制御試験

本試験では、ペブル充填層内に複数本の冷却管を配列し、二次元および三次元温度分布を生じる領域内での増殖材温度制御特性を調べる。ブランケット内における増殖材の体積発熱率は実験炉ブランケットの第一壁側～後壁側に対して約 10 ～ 1 MW/m³ 程度になると予想される⁴⁾。コールド試験において体積発熱を模擬することは、その発熱率分布の制御が十分に行えないことから現状では困難である。ここでは、ペブル充填層内にヒータを配置し集中的な熱発生部分を分散させることによって体積発熱の模擬に代えることとした。試験体としては、周囲への熱放散の影響を防止してブランケット内の冷却管配列状態での温度分布を模擬するという観点から、充填層内に 5 ～ 10 本の冷吸管列を数列配置したものとする。

3.2.3 主要機器・系統設計

本設備の系統図を Fig. 3.2.1 に示す。また、Table 2.3.2 および Table 3.2.1 に示すように、本設備では熱源としてのヒータへの電気供給および除熱のための冷却水の供給、ペブル充填層へのパージガスの供給が必要となる。設置すべき装置としては冷却水循環用のポンプおよびガス供給用のブロワ等である。Table 3.2.2 にポンプおよびブロワの仕様を示す。

伝熱・流動試験においては、例えば高熱負荷試験設備における電子ビーム照射装置のような、大型の機器は必要ではない。むしろ試験体の構造をどのようにするかが重要であり、この観点から本設備の設計にあたっては試験体に関する検討に重点を置いた。

Fig. 3.2.2 にパージガス流動試験のための試験体を示す。これは増殖材充填領域冷却管の模擬

を含んだ試験体である。試験体前面は二重のガラス板が設置された窓となっており試験体内部の状況を観察することができる。2枚のガラス板の間を真空引きすることで観察窓からの熱の放散を極力防止する。模擬冷却管は強化ガラス製とし、この中にファイバスコープを挿入することにより管周辺の状況をも観察できるものとした。また、充填層内に温度分布が生じた場合についても試験することを考え、試験体の一面にヒータパネルを、他面に冷却パネルを設置している。

増殖材温度制御試験のための試験体を Fig. 3.2.3 に示す。増殖材充填領域での発熱を、増殖材温度が最高になると予想される箇所へのヒータ配置により模擬したものである。増殖材充填領域にはヘリウムギャップ等の熱抵抗層を施した冷却管を配置し、多数の冷却管配列による二次元および三次元効果を含む総合的な試験を行う。なお、熱抵抗層として気体を用いる場合には気体の種類 (He, Ar, N² 等) を変えた場合の影響について調べると共に、気体の圧力を変化あるいは気体を流動させること等による温度制御 (active control) の効果についても検討するものとする。

以上の伝熱・流動試験設備の概略レイアウトを高熱負荷試験設備および健全性試験設備と共に Fig. 2.3.1 に示した。

参考文献

- 1) 臨界プラズマ研究部, “準定常核融合実験炉 (FER-Q) 概念設計報告書 (その2) (昭和59年度標準設計)”, JAERI-M 85-178, (1985. 12)
- 2) 東稔達三, 関昌弘 et al., “核融合動力炉ブランケットシステムの技術的検討”, JAERI-M 87-017, (1987. 3)
- 3) 田中義久, 小林武司 et al., “核融合実験炉 (FER) 炉内構造物の概念設計”, 川崎重工技報 87号, (1985. 1)
- 4) 臨界プラズマ研究部, “核融合実験炉 (FER) 重要技術課題の検討 (昭和59年度)”, JAERI-M 85-179, (1986. 1)

3.3 健全性試験設備

3.3.1 設備の目的

核融合炉内に設置する増殖ブランケットには、冷却材圧力およびページガス圧力等の圧力荷重、表面熱流束および体積発熱としての熱荷重、プラズマの立ち上げ時および立ち下げ時、ディスラプション時の電磁力荷重が作用する。実機炉内においてはこれらの荷重が複雑に重畳して作用するため、その設計法を確立することが急がれている。本設備は、以上の荷重に対するブランケットの健全性に関する工学実証データを取得し、設計に反映することを目的とするものである。

3.3.2 試験項目および試験条件

Table 2.3.3 に健全性に関する試験項目および概略試験条件等を示した。試験体規模および試験方法・条件等に対する考え方を Table 3.3.1 に示す。試験項目は、耐圧試験、熱応力試験、電

磁力試験およびそれらの重畳試験に大別される。

耐圧試験では部分モデルおよび実機試作体等の実機大試験体を使用する。また本設備は、高熱負荷試験および熱応力試験、電磁力試験用等に製作された試験体の耐圧試験も行うものとする。

熱応力試験については、実機大の部分モデルを用いる試験および構造模擬モデルを使用する試験を考える。構造模擬モデルは、主に設計法の検証用データの取得を目的としたもので、増殖ブランケットの構造的特徴（第一壁流路および内部補強板、冷却管支持板等）を備え、ブランケット構造強度に及ぼす影響を検討することが可能な試験体である。この観点から、構造模擬モデルの大きさとしては実機の $1/4 \sim 1/2$ あるいはブランケット幅として $0.5 \sim 1\text{m}$ 、ブランケット厚さ $0.2 \sim 0.3\text{m}$ 以上とすることが望ましい。なお、第一壁内温度差やブランケット容器壁間温度差による応力など表面熱流束に大きく起因する熱応力については、前記の高熱負荷試験設備において試験することとする。体積発熱等に基づく冷却管支持板の熱応力および冷却管管部での熱応力については、実機大の部分モデルを用い、ヒータの設置により各構造材の温度を模擬した試験を行うものとする。増殖材と冷却管周囲のスペース管（熱抵抗層の確保用に設置）の熱膨張差に伴う機械的相互作用に対しては、伝熱・流動試験設備での増殖材温度制御試験（Fig. 3.2.3）の際にデータを取得する。

電磁力試験については、これも実証という観点からは実機大の試験体に実機相当の荷重をかけることが望ましい。しかし、コスト的および技術的に実機条件を満足することは困難である。一方、解析コードにおける最近の進展等から電磁力評価の信頼性が向上しつつある。このことから、本試験においては実機大試験体を用いる場合は部分モデルとし、ブランケット全体構造が問題となる場合には構造模擬モデルを使用して、主に設計法の検証のためのデータ取得を行うものとする。電磁力の発生方法としては、2個並置した定常磁場コイル（TFコイルを模擬）内にプラズマを模擬したコイルを設置し、このプラズマ模擬コイルの電流を遮断することにより、定常磁場内に設置した試験体に渦電流および電磁力を発生させるものとする。プラズマ模擬コイルを設置することにより核融合炉内でのプラズマとブランケットの位置関係を再現し、ブランケットに生じる渦電流のモードおよび電磁力の方向、分布について比較的実機に即した検討が可能になる。

圧力と熱荷重の重畳試験は高熱負荷試験設備で実施するものとする。これは高熱流束の照射試験時に空気あるいは水による加圧システムを試験体に接続することで実施可能である。圧力と電磁力および熱荷重と電磁力の重畳試験は、いずれも上記の電磁力試験装置を用いて実施する。これらは電磁力試験の際に、空気あるいは水による加圧システムの接続およびヒータ設置による構造材温度の模擬により試験する。圧力と熱荷重、電磁力の重畳に対しても同様に加圧システムとヒータの設置を行って試験する。

3.3.3 主要機器・系統設計

健全性試験設備で行う試験のうち、耐圧試験に対しては加圧用の空気あるいは水の供給系が必要である。熱応力試験は3.3.2で述べたようにその多くが伝熱流動試験設備で実施可能である。本設備ではブランケット容器内の補強板および冷却管支持板、冷却管管板の熱応力試験を考慮しており、ヒータ用の電力供給が必要となる。

本設備に設置する装置としては電磁力試験装置が最も大きく設備計画に与える影響も支配的と

なる。ここでは電磁力試験装置に関する検討について述べることとする。

なお、各種使用材料の物性値および機械特性値等の基礎データについては別途研究開発が行われるものとして本設計では考慮しないものとする。ただし、増殖ブランケットで特有に使用する材料（組み合わせ材料あるいは複合材料を含む。例えば、増殖材にステンレス等のクラッドを施したもの）に対するデータ取得の必要が生じた場合に対処するため、引っ張りおよび曲げ、衝撃、クリープ等の試験機を設備内に備えておくものとする。

(1) 電磁力試験装置の概要

プラズマディスラプション発生の際にはプラズマを取り囲むブランケット等の構造体に誘起される渦電流のために構造体上に大きな電磁力が生じる。この電磁力は熱応力や内圧による応力と共にブランケットの健全性に関わる重要な問題となっている。ブランケットの電磁力に対する評価については解析コードによる検討が先行して進められており^{1),2)}、単純な構造のものについては評価の信頼性が向上しつつある。しかし、より現実的な構造体（例えば、ブランケットには第一壁に密に配置された冷却チャンネルがあり、内部に冷却配管や補強板等が設けられている。）については評価手法に関して未解決な面が多く今後の発展に期待するところが大きい。本装置は複雑構造体としてのブランケットに生じる電磁力およびその電磁力に対するブランケットの健全性に関する工学実証データを取得するためのものである。

試験装置の概念を Fig. 3.3.1 に示す。ここではプラズマを模擬するコイルを定常磁場コイル（トロイダルコイルを模擬）内に設置し、プラズマ模擬コイルの電流変化によってディスラプションを模擬して、構造物に及ぼす電磁力の影響を試験する。

試験体としては、上述のようなブランケットの構造的特徴を把握することを目的として実機の1/3（高さ1.2 m、幅0.6 m、厚さ0.3 m）程度のものを設定した。

(2) プラズマ模擬コイル

a) コイル電流によるプラズマの模擬

Fig. 3.3.2 にプラズマ電流分布の例（1986年度に FER 設計 ACCS オプション³⁾）を示す。ここでは、この電流分布を Fig. 3.3.3 に示すように9領域に分割したコイル電流で模擬するものとする。ただし、装置規模を過大としないことを考慮して、総電流値を約 500 kA（JFT-2M のプラズマ電流値と同程度⁴⁾）とした。ディスラプション時のプラズマ電流は指数的に減衰するものとして次式で模擬する。

$$i_p = i_{p0} \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3.3.1)$$

b) コイル構造

コイル構造としては Table 3.3.2 に示すように、強制水冷却（常電導）方式および液体窒素冷却方式、液体ヘリウム冷却方式の3つの方式が考えられる。本設計では電流密度のピーク値が 2 A/mm^2 以下でよいことおよび保守が容易であること等の理由から強制水冷却方式を採用する。またコイル用電源を過大にしないことから、これを 1 kA の直流電源とすることとした。プラズマ電流を模擬するために分割した上記9領域に対しては、1本あたりの電流値 1 kA の導体の本数を調節することにより必要電流を供給する。総電流値約 500 kA であることから導体の総本数として約 500 本が必要であり、これを直列に引き回す計画とした。各領域でのコイル電流および必要となる導体本数、設置位置を Table 3.3.3 に示す。

コイルは、プラズマ電流に相当する主要部および導体を直列につなぐための引き回し部（低抵抗部）の2つの部分より構成するものとする。導体としてはFig. 3.3.4に示すような矩形断面構造を考え、主要部では一辺の長さを30 mmとする。引き回し部は主要部と同様の矩形断面構造とするが、主要部に比べ空間的制約がないことおよびでき得るかぎり抵抗を小さくしたいこと等の理由から一辺の長さを60 mmとして計画する。冷却流路は、主要部で15 mm、引き回し部で30 mmとする。導体一本あたりの電流値が1 kAであることから、電流密度は主要部で 1.38 A/mm^2 、引き回し部で 0.35 A/mm^2 となる。これらは電気銅の許容電流密度 10 A/mm^2 に対して十分余裕を持ったものとなっている。

Fig. 3.3.5にプラズマ模擬コイルの系統線図を示す。受電設備（本設計では検討していない）よりトランスおよびサイリスタを通して所要の定電流をプラズマ模擬コイルに通電する。直流遮断器には真空遮断器を使用する。

c) 冷却系

コイルの全抵抗は、導体を直列に接続するため導体本数に比例する。1ターンあたりの平均導体長さは主要部で約3 m、引き回し部で約5 mである。次式により主要部の抵抗 0.042Ω 、引き回し部の抵抗 0.017Ω および全抵抗 $R_{all} = 0.059 \Omega$ となる。ただし、電気銅の電気抵抗率を $2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ とした。

$$R = \rho l_c n / A_c \quad (3.3.2)$$

ここで、 n ：導体本数、 ρ ：電気抵抗率、 l_c ：導体長さ、 A_c ：導体断面積

導体に流れる電流 $i_c = 1 \text{ kA}$ より、全電圧 v_{all} は次式を用いて59 V必要である。

$$V_{all} = i_c \times R_{all} \quad (3.3.3)$$

また、全発熱量 Q_{all} は次式より59 kWとなる。

$$Q_{all} = V_{all} \times i_c \quad (3.3.4)$$

冷却水の温度上昇を 15°C （入口 25°C —出口 40°C ）とした場合、必要水量は 3.4 t/h となる。ここでは50ターンを1ユニットとし全導体を10ユニットに分割して冷却するよう計画する。したがって1ユニットあたりの冷却水量は 340 kg/h 、流速は主要部で 0.530 m/s 、引き回し部で 0.132 m/s となる。このときの圧力損失は主要部および引き回し部でそれぞれ 42 kPa および 2 kPa 、合計で 44 kPa であり、冷却を行う点からは十分達成可能である。

d) コイル電気特性

円筒状ソレノイドコイルに対する式を用いてプラズマ模擬コイル主要部および引き回し部を含めた自己インダクタンスを概算する。このとき引き回し部は主要部と同形状で引き回されていると仮定した。次式において $a = 1.4 \text{ m}$ 、 $l = 2.8 \text{ m}$ 、 $N = 502$ 、 $K = 0.7$ として、自己インダクタンス L は 0.455 H となる。

$$L = K \pi a^2 \mu_0 N^2 / l \quad (3.3.5)$$

ここで、 a ：円筒コイル半径、 l ：円筒コイル長さ、 N ：総巻数、 μ_0 ：真空の透磁率（ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ）である。 K は a/l の関数（Fig. 3.3.6）で長岡係数と呼ばれる。

プラズマ模擬コイルをFig. 3.3.7に示すような電圧 V_e を持つRL回路に置き換えて考えると、スイッチ s を切ったからの電流の変化は時間 t に対して

$$i = V_e / R \cdot \exp(-Rt/L) \quad (3.3.6)$$

で表され、電流が $1/e$ に減衰する時刻は

$$\tau = L/R \quad (3.3.7)$$

として求められる。ここで $\tau = 15 \text{ msec}$ (FER で想定された電流消滅時間⁵⁾) を考えると、自己インダクタンス L が 0.455 H であることから必要な抵抗値は $R = 30 \Omega$ となる。

以上のような考え方に基づいたプラズマ模擬コイルの仕様を Table 3.3.4 に示す。

e) 模擬コイルの問題点

本設計のようにプラズマ電流を単純にコイル電流で代用する考え方については、さらに以下の影響を考慮した詳細な検討が必要である。

- ① プラズマとプラズマを取り囲む構造体との相互インダクタンス
- ② プラズマと閉じ込め磁場との相互作用
- ③ プラズマディスラプション時の電流分布の複雑な変化

とくに本設計の模擬コイルを用いて電流変化時間、減衰波形等のディスラプション条件を精度良く達成するためには、コイルの自己インダクタンスやコイルとターゲット(ブランケット)との間の相互インダクタンスを考慮した回路定数を求めなければならない。

(3) 定常磁場コイル

プラズマ模擬コイルに流れる電流を短時間で遮断することにより試験体には渦電流が発生し、これを定常磁場(トロイダル磁場)の中に置くことにより試験体に電磁力を負荷させる事ができる。本項では定常磁場を発生させるために必要な定常磁場コイルについて述べる。

a) コイル本体

Fig. 3.3.8 に定常磁場コイルの形状を示す。本コイルをプラズマ模擬コイル主要部の両端に1個ずつ計2個設置する。発生磁場としては 1.5 T (JFT-2 M相当) を考えた。導体にはプラズマ模擬コイル同様、電気銅を使用するものとするが、コイルの厚さをできるだけ薄くするために、電流密度を電気銅のほぼ許容値と考えられる 10 A/mm^2 とした。このときのコイル1個あたりの起磁力は 740 kAT である。

プラズマ模擬コイルと同様に導体1本当たりの電流を 1 kA とすると、必要なターン数は1個当たり 740 turn である。1turnあたりの平均導体長さを 10 m とすると、コイルの全抵抗は、式(3.3.2)より 0.88Ω となる。また、全電圧および全発熱量は式(3.3.3)および式(3.3.4)よりそれぞれ 880 V 、 880 kW となる。ただし1本当たりの導体断面積は 168 mm^2 、冷却流路断面積は 16.7 mm^2 として計算を行なった。このときの電流密度は 6 A/mm^2 となり、電気銅の許容範囲内に抑えられている。

b) 電源および冷却系

コイル本体の設計値より、電源には出力 1000 kW 程度のものが必要となる。プラズマ模擬コイルに比べると設備が多少大型化することが予想されるが、技術的には特に問題はない。

冷却系については、前述した発熱量から1個当たり 50 t/h の流量が必要となる。いま 740 本の冷却管で並列に冷却することを考えると、圧損は 42 kPa となり十分に冷却可能である。

以上、定常磁場コイルの仕様を Table 3.3.4 に示す。

参考文献

- 1) 例えば, 東稔達三, 他, 核融合動力炉ブランケット・システムの技術的検討, JAERI-M 87-017
- 2) 例えば, K.Miya, T.Tanaka, The International Workshop for Eddy Current Code Comparison-Regional Workshop in Japan-, Oct. 20-21, 1986
- 3) 日本原子力研究所臨界プラズマ研究部, 私信
- 4) 日本原子力研究所, 核融合研究開発の現状 1986年, (1986. 12)
- 5) 臨界プラズマ研究部, 準定常核融合実験炉(FER-Q)概念設計報告書(その1)
(昭和59年度標準設計), JAERI-M 85-177, (1985. 12)

3.4 製造技術開発設備

3.4.1 設備の目的

本設備は, ブランケット容器の製作技術開発および固体増殖材ペブルの製造技術開発を行うためのものである。

3.4.2 試験項目および試験条件

(1) ブランケット容器の製作技術

シェル導体付き第一壁ブランケット容器の製作工程の一例を Fig. 3.4.1 に示す。

ブランケット容器の製作における重要な技術を大別すると次のようになる。

- ・ 接合技術
- ・ 曲げ, 機械加工技術
- ・ 非破壊検査技術

特に接合技術に関しては, 第一壁の接合, 部分容器から完成容器への一体化接合, 管と管板の接合, それ以外の接合が課題である。ブランケット容器の製作において有望と考えられる接合法を比較検討した結果を Table 3.4.1 に示す。

第一壁の最も優れた接合法としてHIP(Hot Isostatic Pressing)法をあげることができる。HIP法は拡散接合法の一種であるが, 一般的な拡散接合法と異なる点は加圧方式である。一般的な拡散接合法が機械的一軸圧接であるのに対して, HIP法は静水圧による均圧圧接である。このため, HIP法では, 母材の形状(板圧, 曲面)に関係なく接合が可能となる。HIP法のもう一つの特徴は, 接合部が溶融溶接のような組織変化を起こさないことから, 接合部の機械的特性として母材に近い値が期待できる点にある。

部分容器から完成容器への一体化接合法として, TLP(Transient Liquid Phase)法, 電子ビーム溶接法(EBW), レーザ溶接法(LW)が考えられる。中でもTLP法は, 溶融接合であるEBWやLWとは異なり, 液相拡散接合のため接合による変形が少なく, 部分容器から完成容器への一体化接合法として極めて有利である。TLP法は, 接合界面に母材より低融点でかつ母材に近似した組成のインサート材を挿入し, 加熱によってインサート材を一旦溶融さ

せ、さらに接合温度で長時間保持することにより等温凝固を達成する。これにより、接合部は母材と同質になる。TLP法は、固相接合のような大きな接合圧力を必要としない。

以上の考察をふまえ Fig. 3.4.1 の製作工程においては、第一壁の接合には中型のHIP装置、部分容器から完成容器への一体化接合には部分真空型のTLP装置の使用を想定した。また、管と管板の接合は管内面自動TIG溶接装置を、他の接合部分に関しては部分真空型の電子ビーム溶接装置の使用を想定した。なお、図中に示していないが、機械加工および接合後には、工程毎に加工精度をチェックするための寸法検査および接合欠陥をチェックするための非破壊検査（超音波探傷検査：UT，放射線検査：RT）をそれぞれ実施することになる。

製作工程の一例として Fig. 3.4.1 で考えた製作技術のR & D装置に関する概略仕様およびR & Dの重点項目を Table 3.4.2 に示す。HIP法に関しては品質の安定化や変形の極小化が課題となる。TLP法に関しては、インサート材の開発が急務である。また、部分真空型の装置の使用を想定しているTLP，EBW装置については、部分真空チャンバー接合方式の開発が重要な研究項目となる。非破壊検査については、第一壁の接合欠陥を検出するための超音波探触子の開発および自動欠陥検出システムの開発が重要な検討項目となる。

(2) ペブル製造技術

Li₂O 小径ペブルの製造工程を Fig. 3.4.2 に示す。

小径ペブルの製造において開発を要する技術は、分級技術，造粒技術，粉碎技術およびペブルの高密度化技術である。

これまでの予備的検討から各要開発技術に対して適当と考えられる手法（装置）とそれら装置の概略仕様およびR & Dの重点項目を Table 3.4.3 に示す。

3.4.3 主要機器・系統設計

(1) ブランケット容器の製作技術

ブランケット容器の製作技術開発に必要な装置およびその概略仕様は、Table 3.4.2 に示した通りである。

HIP装置の概略図を Fig. 3.4.3 に示す。電子ビーム溶接装置については、完全真空型および部分真空型の概略図を Fig. 3.4.4 および Fig. 3.4.5 にそれぞれ示す。また、Fig. 3.4.6 にレーザー溶接装置の概略図を示す。

(2) ペブル製造技術

ペブル製造技術開発に必要な装置とその概略仕様は Table 3.4.3 に示した通りである。

ペブル充填試験に必要な装置に関しては、振動装置であり、その概略仕様を下に示す。

- ・積載重量 : 20 Ton
- ・振動方向 : 上下, 左右
- ・加速度 : 1G
- ・振 幅 : ±30 mm
- ・周波数 : 10 ~ 20 Hz

3.5 全体配置計画

本予備設計で検討した各設備の全体配置を計画した。ここでは、一つの建家（増殖ブランケット開発試験施設－Ⅰ）に高熱負荷試験設備，伝熱流動試験設備，健全性試験設備を，別の建家（増殖ブランケット開発試験施設－Ⅱ）に製造技術開発設備に必要とされる各装置を配置するものと仮定した。増殖ブランケット開発試験施設－Ⅰの配置計画を Fig. 2.3.1 に，増殖ブランケット開発試験施設－Ⅱの配置計画を Fig. 2.3.2 および Fig. 3.5.1 にまとめた。

Table 3.1.2 Test Items for High Heat Flux Components (1/2)

Single Effects

1. Thermal-hydraulics

o Heat Transfer for One-sided Heating

- single channel -

1) Water Coolant

i) non-boiling heat transfer
 rectangular, circular etc.

ii) boiling heat transfer

ONB heat flux

DNB heat flux

flow stability with subcooled nucleate boiling

2) Gaseous Coolant (He)

3) Liquid Metal

4) Heat Transfer Enhancement

- multiple channel -

1) Flow Distribution

2) Flow Blockage

o Verification of Analytical Tools for Design

2. Thermo-mechanical Responses

o Thermal Fatigue

o Bonding Integrity especially Duplex Structures

W-Cu, Graphite-Cu/SS, Surface Coating etc.

o Verification of Analytical Tools

3. Surface Behavior at Disruption

o Melting, Evaporation and Solidification

o Crack Initiation and Propagation

o Verification of Analytical Tools

Table 3.1.2 Test Items for High Heat Flux Components (2/2)

Multiple Effects

1. Restraint
 - o Thermal Fatigue under Restraint Conditions
 - o Crack Growth under Restraint Conditions

2. Electromagnetic Force
 - o Melt Layer Stability
 - o Crack Growth by Electromagnetic Force
 - o MHD Effects for Liquid Metal Coolant

3. Plasma Material Interaction
 - o Physical Sputtering Erosion
 - o Chemical Sputtering Erosion
 - o Redeposition
 - o Change of Surface Structure
segregation etc.
 - o Hydrogen Implantation

4. Neutron
 - o Irradiation Effects
 - embrittlement
 - creep/fatigue
 - swelling etc.
 - o Volumetric Heating

Integrated/Component Test

Table 3.1.3 Surface heat fluxes in Tokamak fusion reactors

	FER ¹⁾ (JAERI)	INTOR ²⁾ (LAEA)	FED (ORNL)	JAERI Power Reactor ³⁾ (JAERI)	STARFIRE ⁴⁾ (ANL)	NUMAK (UW)
FUSION POWER (MW)	440	620	180	3200	3510	1981 (peak)
THERMAL POWER (MW)	492		216	4000	4000	2283 (peak)
BURN TIME (sec)	100	200	100	steady	steady	225
DUTY FACTOR (%)	50	80	65	100	100	92
WALL LOAD (MW/m ²)						
NEUTRON THERMAL	1.0 1.3	1.3	0.4	3.3 5.1	3.6 5.0	4.34 6.34
First Wall						
Normal Operation	outboard inboard	outboard inboard	outboard inboard/top armor (near limiter)	0.8 MW/m ²	0.9 MW/m ²	1.081 MW/m ²
	0.13 MW/m ² 0.15 MW/m ² near divertor 0.34 MW/m ² α-particle loss 0.1 MW/m ² peaking factor 10	0.136 MW/m ² 0.116 MW/m ²				
Start-up	beam shine-through max. heat flux 1.5 MW/m ² time constant 1.5 sec duration 4 sec	limiter peaking factor 1.5 duration 4 sec ripple armor 0.4 MW/m ² peaking factor 2 duration 2 sec				
Disruption	peak heat flux 88 MW/m ² duration 15 sec	peak heat flux 85/340 MW/m ² duration 20/5 msec	thermal quench duration 5 msec current quench 248 MW/m ² duration 10 msec	peak heat flux 76 MW/m ² duration 50 msec	peak heat flux 38/153 MW/m ² duration 100/25 msec	
Divertor/Pump Limiter Type	double-null poloidal divertor	single-null poloidal divertor	single pump limiter (bottom)	single pump limiter (bottom)	single pump limiter (mid-plane)	none
Normal Operation	peak heat flux 2.0 MW/m ²	peak heat flux 2 MW/m ²	peak heat flux 2.5 MW/m ²	peak heat flux 2.6 MW/m ²	peak heat flux 3.6 MW/m ²	
Disruption	peak heat flux 600 MW/m ² duration 5 msec	peak heat flux 115/460 MW/m ² duration 20/5 msec minor disruption 85/340 MW/m ² duration 20/5 msec	thermal quench 1000 MW/m ² duration 5 msec current quench 248 MW/m ² duration 10 msec			

Table 3.1.4 Parameters of disruption

Reactor	FER	INTOR	
		Major	Minor
Frequency	10^{-3}	10^{-3}	5×10^{-3}
Disruption Time	5 ms (2nd stage: thermal quench)	20 ms (reference)	20 ms (reference)
	15 ms (3rd stage: current quench)	5 ms (alternative)	5 ms (alternative)
Total Energy	180 MJ	290 MJ	
Thermal plasma energy	150 MJ	230 MJ	
Magnetic field energy	30 MJ	60 MJ	
Distribution for Energy Dissipation	to divertor	60 MJ(40% of thermal energy) with same spatial distribution in a normal operation at 2nd stage	80 MJ(part of thermal energy) with same spatial distribution in a normal operation
	to first wall	60 MJ(50% of the rest of total energy) to 30% area of first wall at inboard side with an added peaking factor 2 at 3rd stage 60 MJ(50%) uniformly at 3rd stage	80 MJ(part of thermal energy) to 30% area of first wall (inside, top, bottom) with an added peaking factor 2 70 MJ(the rest of thermal energy) and 60 MJ(field energy) uniformly
Peak Energy Flux	divertor	300 J/cm ²	170 J/cm ²
	first wall	131 J/cm ²	175 J/cm ²

Table 3.1.5 Heat sources for high heat flux simulation

Heat source	Current heating	Radiant heating	Beam heating			
			Electron beam	Laser beam	Ion beam	Neutral beam
Merit	Low cost. Techniques of experiment and measurement have been established.	Available under electromagnetic field. Relatively low cost.	Good controllability with electromagnetic field. High accuracy. Continuous beam operation. Low operation cost. NC control.	Available under electromagnetic field. Optical beam control.	High power. Large beam diameter. Plasma effects simulation(only high incident energy).	Relatively high power. Large beam diameter. Available under electromagnetic field. Plasma effects simulation(only high incident energy).
Problems	Low heat flux. Slow rise time.	Relatively low heat flux. Difficulty of heat flux calibration. Non-uniform heat flux.	Difficult to simulate electromagnetic effects. Relatively long electron range in target. Small beam diameter.	Low efficiency. Large efficiency change due to surface conditions. Low power.	Difficult to simulate electromagnetic effects. Complex and costly operation. Poor controllability. Limit of duration.	Complex and costly operation. Poor controllability. Limit of duration.
Test items	Thermal-hydraulics (low heat flux).	Thermal-fatigue. Melt layer stability.	Disruption simulation. Thermal-hydraulics & thermal-fatigue. Component test.	Electromagnetic field effects test.	Thermal shock. Thermal-fatigue & thermal-hydraulics. Component test. (Plasma effects test).	Thermal-fatigue & thermal-hydraulics. Component test. (Plasma effects test).

Table 3.2.1 Items of thermal-hydraulics tests (1/2)

* : 伝熱流動試験設備内の区分

試験項目	開発手順および試験体スケールに対する考え方	試験方法・条件	設備No.*	備考
熱抵抗層特性 冷却管周囲, ブランケット, 容器壁周囲等	A ①実機大・部分モデルによる要素試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒータによる熱入力 ・水による冷却 ・熱抵抗材料として, セラミック等の固体およびHe, Ar等の気体を考慮 ・気体を用いる場合には, 滞留させる場合および流動させる場合等について試験する。 	1	
有効熱伝導率測定 (増殖材充填領域)	B ①増殖材のみを充填した層を用いた基礎試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒータによる熱入力 ・水による冷却 ・ページガスの流動が有効熱伝導率に及ぼす影響およびペブル増殖材の充填分布に及ぼす影響についても試験 	2	増殖材のみでなく, 金属, セラミック等の材料に対するデータをも取得し, 有効熱伝導率の決定手法をできるだけ一般化するよう考慮する。
ページガス流動	C ①増殖材充填層を用いた基礎試験 (B)の試験でもデータ取得 ②実機大・部分モデルによる要素試験	<ul style="list-style-type: none"> ・常温 (入熱なし) の試験およびヒータ加熱, 水冷却による温度勾配をつけた試験を行う。 	2	増殖材のみでなく, 金属, セラミック等を模擬材料としても使用する。

Table 3.2.1.1 Items of thermal-hydraulics tests (2/2)

試験項目	開発手順および試験体スケールに対する考え方	試験方法・条件	設備No.	備考
冷却材流量配分 (第一壁冷却流路, 増殖材充填領域冷却管)	D ① 実機大・部分モデルによる要素試験	<ul style="list-style-type: none"> ・常温試験およびヒータ加熱によるチャンネル毎の温度分布等を考慮した試験を行う。 		冷却チャンネル数あるいは10数本以上で全長を模擬した試験体(第一壁冷却流路の場合は, ブラケットの下部, 中央部, 上部また増殖材充填領域冷却管の場合には, 第一壁側, 中央部, 後壁側を模擬する代表チャンネルをそれぞれ数本ずつ設置して試験することが考えられる。)
増殖材温度制御	C ① 実機大・部分モデルによる要素試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒータによる熱入力 ・水による冷却 ・数本~10数本の冷却管を配列(実機での温度分布, とくに最高温度と最低温度を模擬) ・冷却管周囲の熱抵抗材料を気体とした場合には, 自然対流および強制的な流動の効果等についても検討。 ・パージガスの流動が有効熱伝導率に及ぼす影響等についても検討。 ・くり返し負荷についても考慮 	3	冷却管の配列に伴う2次元効果の検討。 増殖材の熱心力に対する健全性, くり返し負荷に伴う増殖材充填率分布の変化, 熱抵抗層スペーサ管およびライナの健全性等についてもデータ取得。

Table 3.2.2 Major specifications of pumps and blower
in thermal-hydraulic test facility

Pump I

type	:	volute pump
fluid	:	H ₂ O
inlet pressure	:	0.1 MPa
inlet temperature	:	room temperature
head	:	< 10 ~ 50 m
flow rate	:	≲ 5 m ³ /h

Pump II

type	:	volute pump
fluid	:	H ₂ O
inlet pressure	:	0.1 MPa
inlet temperature	:	room temperature
head	:	< 10 ~ 50 m
flow rate	:	≲ 200 m ³ /h

Blower

type	:	centrifugal
inlet pressure	:	0.1 MPa
inlet temperature	:	room temperature
pressure ratio	:	≲ 2
flow rate	:	≲ 500 m ³ /h

Table 3.3.1 Items of integrity tests (1/5)

*: 健全性試験設備内の区分

試験項目	試験対象箇所		開発手順および試験スケジュールに対する考え方	試験方法・条件	設備No.*	備考
	試験荷重	試験項目				
圧力	冷却材圧力	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁 (側壁を含む) 流路 後壁流路 冷却材ヘッダおよび管板 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 実機大・部分モデルによる要素試験 ② 実機大・全体モデルによる実証試験 	<ul style="list-style-type: none"> 水をを用いて加圧 実機と同等の圧力: ~17 MPa 実験炉: 1.0 ~ 1.5 MPa テストモジュール: 1.0 ~ 15 MPa 動力炉: 9 ~ 15 MPa に余裕を考慮 	1	<p>実機大・全体モデルに対しては、原則として実機製作時に試験、ただし、各種試験体製作時にもデータを取得。</p>
	容器内圧 (パージガス圧力等)	<ul style="list-style-type: none"> 容器全体 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 実機大・全体モデルによる実証試験 	<ul style="list-style-type: none"> 空気をを用いて加圧 実機と同等の圧力: ~0.5 MPa 実験炉, 動力炉共: ~0.1 MPa ただし, 容器外は高真空のため, 差圧として~0.1 MPa. これに余裕を考慮 冷却材のブランケット容器内への, 漏洩等, 種々の効果を試験できるよう, 水を用いて冷却材圧力程度まで加圧できるようにする 	1	<p>原則として, 実機製作時に試験, ただし, 各種試験体製作時にも, 第一壁流路, 内部補強板, ブラケット容器の屈曲, 湾曲等の影響に対するデータを取得</p>
熱	表面熱流束 体積発熱	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁内温度差による熱心力 ブランケット容器壁間 (とくに第一壁/後壁) 温度差による熱心力 	<p>C</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 実機大・部分モデルによる要素試験 	<ul style="list-style-type: none"> 高熱流束熱源による熱照射 実機で予想される熱流束 (通常運転時, ディスラプション時等) 通常運転時負荷に対しては, 水あるいはガスによる冷却を考慮 くり返し負荷も考慮 	1	<p>表面熱流束のみの負荷 (表面熱流束の値を大きくとることにより体積発熱による温度上昇模擬も考慮)</p> <p>高熱負荷試験設備で実施</p>

Table 3.3.1 Items of integrity tests (2/5)

試験 荷重	試験項目		開発手順および 試験体スケールに対する考え方	試験方法・条件	設備 No.	備考
	対象	箇所				
熱 表面熱流束 体積発熱			② 構造模擬モデルによる特性把握 試験 (第一壁流路および内部補強板等の 効果を検討できる大きさとす る。 実構造の寸法を厳密にスケール ダウンするのではなく、上記各 構造の効果を検討し、設計手法 に反映することを考慮。 プラン 第一壁の製作性を考え、プラン ケット容器寸法として、実機の 1/5~1/2)	<ul style="list-style-type: none"> 高熱流束熱源による熱照射 実機で予想される熱流束 (通常運転時、ディスタブション時等) 通常運転時負荷に対しては、水あるいは ガスによる冷却を考慮 くり返し負荷も考慮 	—	表面熱流束のみの負荷 (表面熱流束の値を大きくと ることにより体積発熱による 温度上昇を模擬することも考 慮。) ディスタブション時の熱負荷 に対しては部分照射とする。 高熱負荷試験設備で実施
		<ul style="list-style-type: none"> 冷却管管板部熱応力 冷却管支持板 (位置決 め用) 熱応力 	<p>D</p> <p>① 実機大・部分モデルによる要素 試験 (冷却管 1 本~数本の全長に対す る試験体)</p> <p>② 構造模擬モデルによる特性把握 試験 (上記 C-② 試験で実施。 プランケット容器模擬試験体中 に、冷却管および支持板等を設 置する。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 冷却管、管板、支持板へのヒータ設置 により、増殖領域からの熱流束および 体積発熱による各構造材温度を模擬 水あるいはガスによる冷却 くり返し負荷も考慮。 高熱流束熱源による第一壁表面への熱 照射 	2	体積発熱のみを模擬 表面熱流束のみの負荷 (冷却管、支持板等のプランケッ ト内構造物と第一壁との温度 差による熱応力を検討) 高熱負荷試験設備で実施

Table 3.3.1 Items of integrity tests (3/5)

試験項目	試験項目		開発手順および試験体スケールに対する考え方	試験方法・条件	設備No.	備考
	試験	対象箇所				
熱	表面熱流束 体積発熱		③ スケールモデルによる特性把握試験 (第一壁の製作性から、実機の1/2~1/3)	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁, 冷却管, 内部補強板等にヒータを設置 水あるいはガスによる冷却 運転時の構造材温度, とくに, 最高温度と最低温度が実機と同等になるようにする。 	2	
	体積発熱	<ul style="list-style-type: none"> 冷却管周囲熱抵抗層用スペーサ管/増殖材インタラクション 	E ① 実機大・部分モデルによる要素試験	<ul style="list-style-type: none"> 増殖材充填領域へのヒータ設置等により, 実機で予想される温度分布(とくに最高温度および最低温度)を模擬。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 増殖材の熱心力に対する健全性に関するデータ取得。 くり返し負荷に伴う増殖材充填率の分布の変化についてもデータ取得。 増殖材温度制御試験と共に伝熱・流動試験設備で実施
電磁力	第一壁		F ① 実機大・部分モデルによる要素試験		3-1	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁冷却流路構造が渦電流分布, 電磁力分布に及ぼす影響を検討
	容器全体		② 構造模擬モデルによる特性把握試験 (第一壁の製作性を考え, プラケット容器寸法として実機の1/4~1/2)	<ul style="list-style-type: none"> 2個並置したマグネット内にプラズマ模擬コイルを設置し, 模擬コイルの電流を変化させることにより, ディスラプション等を模擬。 	3-2	

Table 3.3.1 Items of integrity tests (4/5)

試験項目		試験方法・条件	設備 No.	備考
荷重	対象箇所			
圧力 + 熱	冷却材圧力 容器内圧 表面熱流束 体積発熱 容器全体	<ul style="list-style-type: none"> ・高熱流束熱源による第一壁表面への熱照射 ・水あるいは空気による加圧 	—	表面熱流束のみの負荷 <u>高熱負荷試験設備で実施</u>
圧力 + 電磁力	冷却材圧力 容器内圧 容器全体	<ul style="list-style-type: none"> ・構造材に設置したヒータータによる各部温度の模擬 ・水（冷却材流路）および空気（容器内部）による加圧 	2	
圧力 + 電磁力	冷却材圧力 容器内圧 容器全体	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネット内に設置したプラズマ模擬コイルの電流変化により電磁力を発生 ・水（冷却材流路）および空気（容器内部）による加圧 	3-2	
熱 + 電磁力	表面熱流束 （体積発熱） 第一壁	<ul style="list-style-type: none"> ・ふく射熱源（赤外線ヒータ等），あるいは，構造材へのヒータ設置等により，構造材内温度分布を発生 	3-1	温度分布が高電流分布，電磁力分布に及ぼす影響を検討

Table 3.3.1 Items of integrity tests (5/5)

試験項目		開発手順および試験体スケールに対する考え方	試験方法・条件	設備No.	備考
荷重	対象箇所				
表面熱流束 (体積発熱)	<ul style="list-style-type: none"> 容器全体 	② 構造模擬モデルによる特性把握試験 (F-②試験で実施)	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁等へのヒータ設置により、運転時の構造材温度を模擬 水あるいはガスによる冷却 	3-2	
	<ul style="list-style-type: none"> 第一壁 電磁力の溶融層挙動への影響を検討 				
圧力 + 熱 + 電磁力	冷却材圧力 容器内圧 表面熱流束 体積発熱	K ① 構造模擬モデルによる特性把握試験 (F-②試験で実施)	<ul style="list-style-type: none"> 水(冷却材流路)および空気(容器内部)による加圧 構造材へのヒータ設置による構造材温度模擬 プラズマ模擬コイルの電流変化による電磁力の発生 	3-2	

Table 3.3.2 Coil cooling method

	強制水冷却 (常電導)	液体窒素冷却	液体ヘリウム冷却
構造材	電気銅	無酸素鋼	NbTi
許容電流密度 (A/mm ²)	~ 10	~ 20	~ 30
特徴	<ul style="list-style-type: none"> • 他の方式に比べ設備費が低コスト • メンテナンスが容易 • 電源が大型化する (抵抗率が大きい) 	<ul style="list-style-type: none"> • ρ が常電導に比べ小さい • 熱伝達率が高い • 水冷よりもコンパクトになる • 液体ヘリウム冷却より簡便 • 断熱構造が必要 	<ul style="list-style-type: none"> • 電流密度が大きくとれ • 構造が小型化できる • ρ が最も小さくできる • 構造が複雑になる • 設備費が高くなる

Table 3.3.4 Specification of static field coil

本	起磁力 ターン数 導体1本当りの電流 導電率 電流密度 抵抗 発生磁場	1.48 MAT 2個 1個当り740ターン 1kA 電気銅 6 A/mm ² 1個当り 0.88 Ω 1.5 T
冷却系	冷却材 冷却材入口/出口温度 全流量 圧損 冷却材圧力	水 25 °C / 40 °C 100 t/h 42 kPa 0.3 MPa

Table 3.3.3 Specification of plasma modeling coil

本	起磁力 ターン数 導体1本当りの電流 導電率 電流密度 全抵抗 主要部長さ 引き回し部長さ	502 kAT 502 ターン 1kA 電気銅 1.38 A/mm ² (主要部) 0.059 Ω 3 m 5 m
冷却系	冷却材 冷却材入口/出口温度 全流量 圧損 冷却材圧力	水 25 °C / 40 °C 3.4 t/h 44 kPa 0.2 MPa

Table 3.4.1 Characteristics and evaluation of various bonding methods to fabricate first wall and blanket vessel

接合法		H I P	ろう付	T L P	E B W	レーザ溶接
溶接施工	変形	やや大	小	小	やや大	やや大
	面接合	優	優	優	不可	不可
		可	優	優	優	優
	3次元接合	優	不可	不可	不可	不可
接合部	組織	母材と同等	2層組織	ほぼ同等	柱状組織	柱状組織
特性	機械的性質	母材と同時	かなり劣る	やや劣る	ほぼ同等	ほぼ同等
装置	接合用容器	オートクレーブ	真空チャンバー	真空チャンバー	真空チャンバー	不用
	コスト	大	小	中	中	中
総合評価	価	第一壁の製作法として最も優れており、かつその可能性は高い。	第一壁の製作法に關して、品質は低位であるが、現在の技術で対応可能。	部分容器同志の接合法としてもその可能性は高い。	第一壁の製作法としては不向き。容器同志の接合法として可能性有り。	第一壁の製作法としては不向き。容器同志の接合法としては、E B Wよりも更に可能性高い。
	課題	装置の大型化とそれに伴うコストの大幅な増大。	—	材料開発と部分真空加熱法の開発。装置の大型化(全体型*)	装置の大型化とそれに伴うコストの増大。	高出力装置の開発

* 全体真空加熱法

Table 3.4.2 R&D items and facilities for assembling first wall and blanket vessel

組立手順	R & D 装置		R & D のポイント
	名称	概略仕様	
部分容器組立	HIP	1200 °C, 2000 気圧 2500φ × 3000ℓ	<ul style="list-style-type: none"> 3-D 接合 品質の安定化 接合変形の極小化
容器同志接合	TLP	1200 °C 部分真空型	<ul style="list-style-type: none"> インサート材料開発 部分真空チャンバー, 加熱方式開発
	EBW	30 kW (板厚に depend) ^{II} 部分真空型, 2m × 2m × 1.5m ^{II}	<ul style="list-style-type: none"> 部分真空チャンバー接合方式開発 制御機器の開発
	レーザー	20 kW, 4m × 4m × 2.5m ^{II} (板厚に depend)	<ul style="list-style-type: none"> 接合部特性の向上
非破壊検査	UT	2m × 2m × 1.5m ^{II}	<ul style="list-style-type: none"> 探触子開発 自動欠陥検出システムの開発
	RT	(建家) 15m × 15m × 10m ^{II}	<ul style="list-style-type: none"> 自動欠陥検出システムの開発
曲げ加工	プレス装置	8m × 8m × 4m ^H	<ul style="list-style-type: none"> 曲率半径の低減
機械加工	多軸同時制御縦型 フライス盤 (NCテーブル付)	8m × 4m × 0.5m ^H	<ul style="list-style-type: none"> 変形防止対策 (加工精度, 時間, 要領) 加工要領
管-管板接合	管内面 TIG 溶接装置	2m × 1m × 1m ^H	<ul style="list-style-type: none"> 自動溶接システムの開発 非破壊検査手法の開発
寸法検査	レーザー測定装置	8m × 4m × 2m ^H 電子プローブ型	<ul style="list-style-type: none"> 恒温室の試作

Table 3.4.3 Characteristics of R&D Facilities

単位操作	R & D 装置		R & D のポイント	備考
	名称	概略仕様		
分級	振動ふるい	直径 700 mm φ 高さ 991 mm H 処理能力 1-2 Kg/H (-200 mesh) 気密型	1. 処理能力 2. 運転の安定性 (目詰まり防止, 清掃), 操作性 3. 気密の確保 4. コスト (装置コスト, ランニングコスト)	。乾式ふるい。分級法は大きく分けると、いわゆる“ふるい”と風力を利用する“分級装置”に分類される(表・1)。 。Li ₂ O 粉末の場合、その化学的性質(吸湿性、CO ₂ との反応性)から真空中あるいは不活性ガス 雰囲気下での取り扱いが要求される。 。それゆえ、容易に密閉構造とすることができ、“振動ふるい”が適する。 。風力を利用する分級装置は気体から粉体を分離回収するためのフィルター、送風機など付帯設備が必要となり、設備が大がかりとなる。気密保持が難しい。大量の不活性ガスが必要となるなどの問題がある。
粉砕	かくはん槽型媒体かくはん式ミル (媒体: ポー ル)	処理容量 1 L/回 タンク容量 5.5 L/回 気密型 460 W × 845 L × 1194 H	1. 処理能力 (粉碎速度) 2. 粒径, 粒径分布 3. コンタミネーション防止 4. 気密の確保 5. 回収率 6. コスト (装置コスト, ランニングコスト)	。微粉砕装置は表・2 に示すとき種類があるが、Li ₂ O 粉末の場合、その化学的性質から容易に密閉構造とすることができ“ふるい”が適する。 。また、粉砕力の比較的大きいかくはん槽型ボールミルが適する。
造粒	かくはん・転動造粒機	処理容量 1.5-4 Kg/回 1305 mm W × 700 mm D × 1604 mm H	1. 粒径, 粒径分布 (収率) 2. 真球度 3. バイウンダー 4. 見かけ密度 5. 造粒速度 (生産性) 6. 運転の容易さ 7. コスト (装置コスト, ランニングコスト)	。造粒方法は表・3 に示すごとく非常に多くの種類があるが、小粒径 (1 mm φ) の真球に近い粒子の形成が可能なる方法には限られる。 。転動造粒法は、真球に近い小粒径の粒子を効率良く形成することが可能である。
圧縮高密度化	CIP	容器 100 mm φ × 300 mm L 圧力 4000 Kg/cm ²	1. ラバー容器の設計 2. ハンドリング方法 (ラバー容器への充填, 取り出し) 3. CIP 圧力 vs 見かけ密度	。焼結粒子の見かけ密度の調整手段のひとつとして、グリーン粒子の見かけ密度を CIP により調整することを、検討項目に加えた。
焼結	真空高温炉	有効 300 mm W × 300 mm L 容積 300 mm H MAX 温度 1350 °C 真空度 10 ⁻⁶ Torr (RT)	1. グリーン密度 vs 焼結密度 & 開気孔率 2. 焼結条件 (温度, 時間, 真空度) と焼結密度, 開気孔率, 圧縮強度 (高温) グレインサイズ	。Li ₂ O の焼結条件は概略 1000 °C - 1300 °C, 真空度 < 10 ⁻⁴ Torr である。
輸送器	密閉型ステレンス容器	容積 真空, ガスバージ用 バルブ付き	1. 気密確保 2. 操作性 3. 各装置とのマッチング	

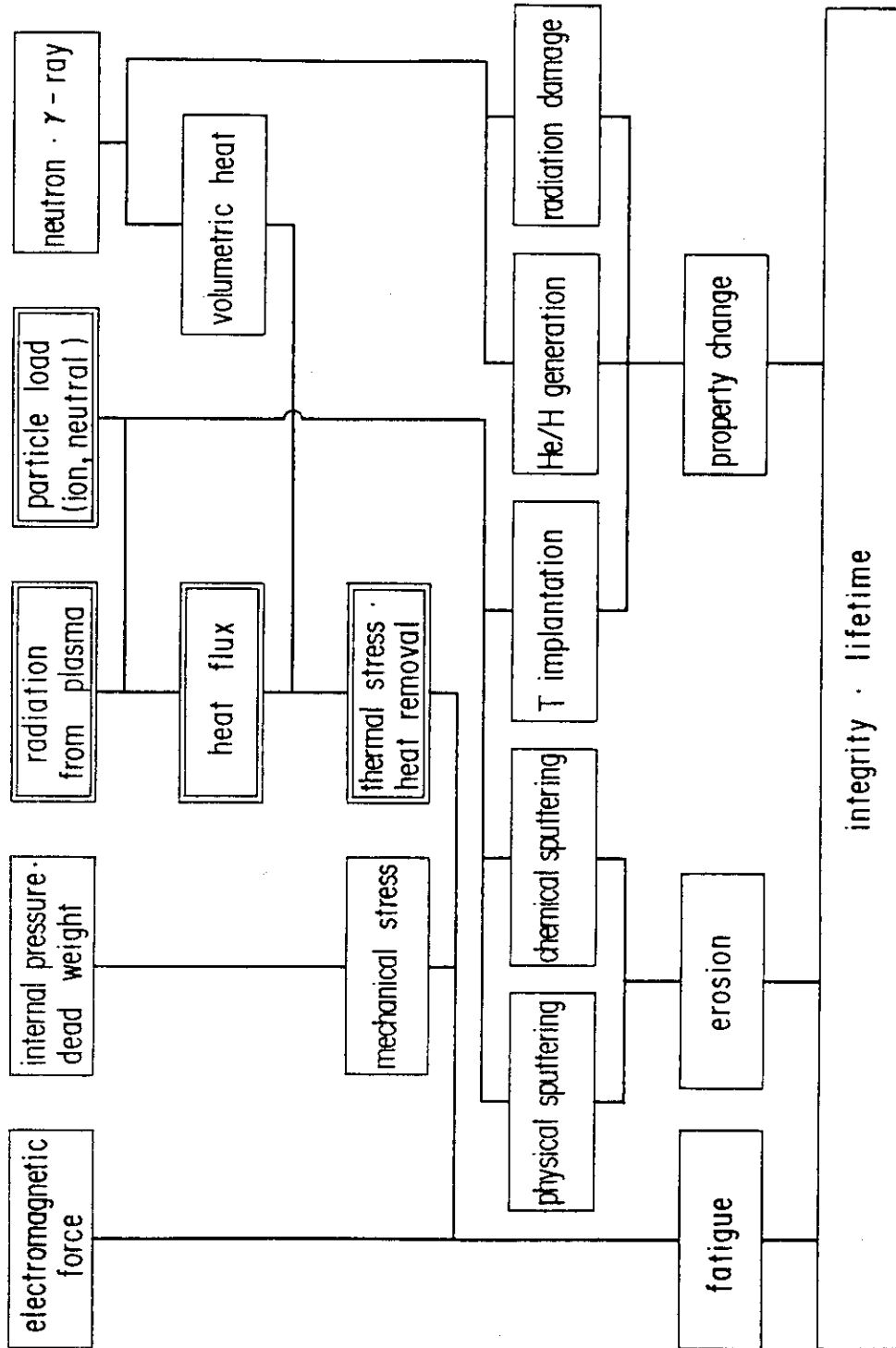


Fig. 3.1.1.1 Issues for high heat flux components development (during normal operation)

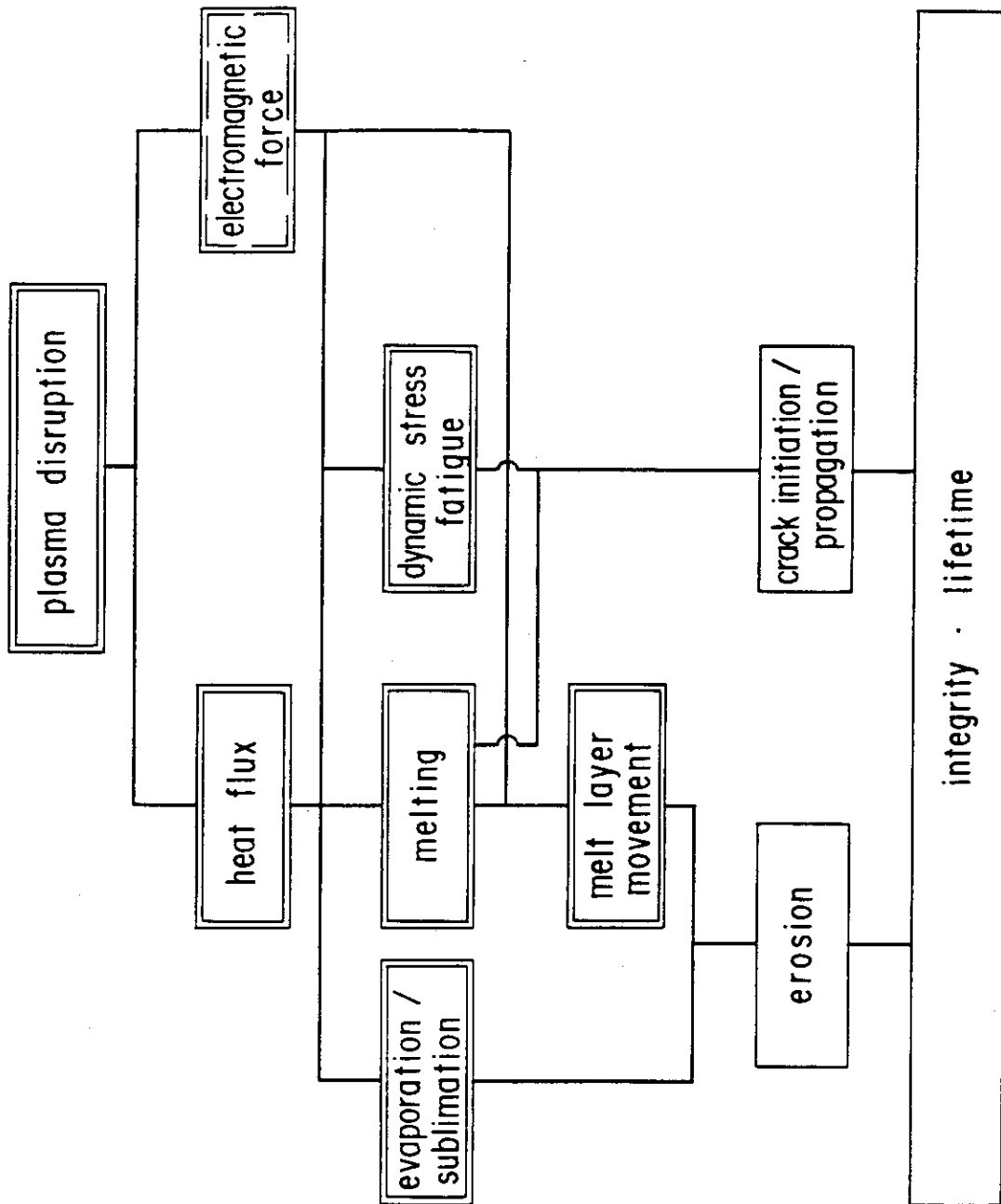


Fig. 3.1.1.2 Issues for high heat flux components development (during plasma disruption)

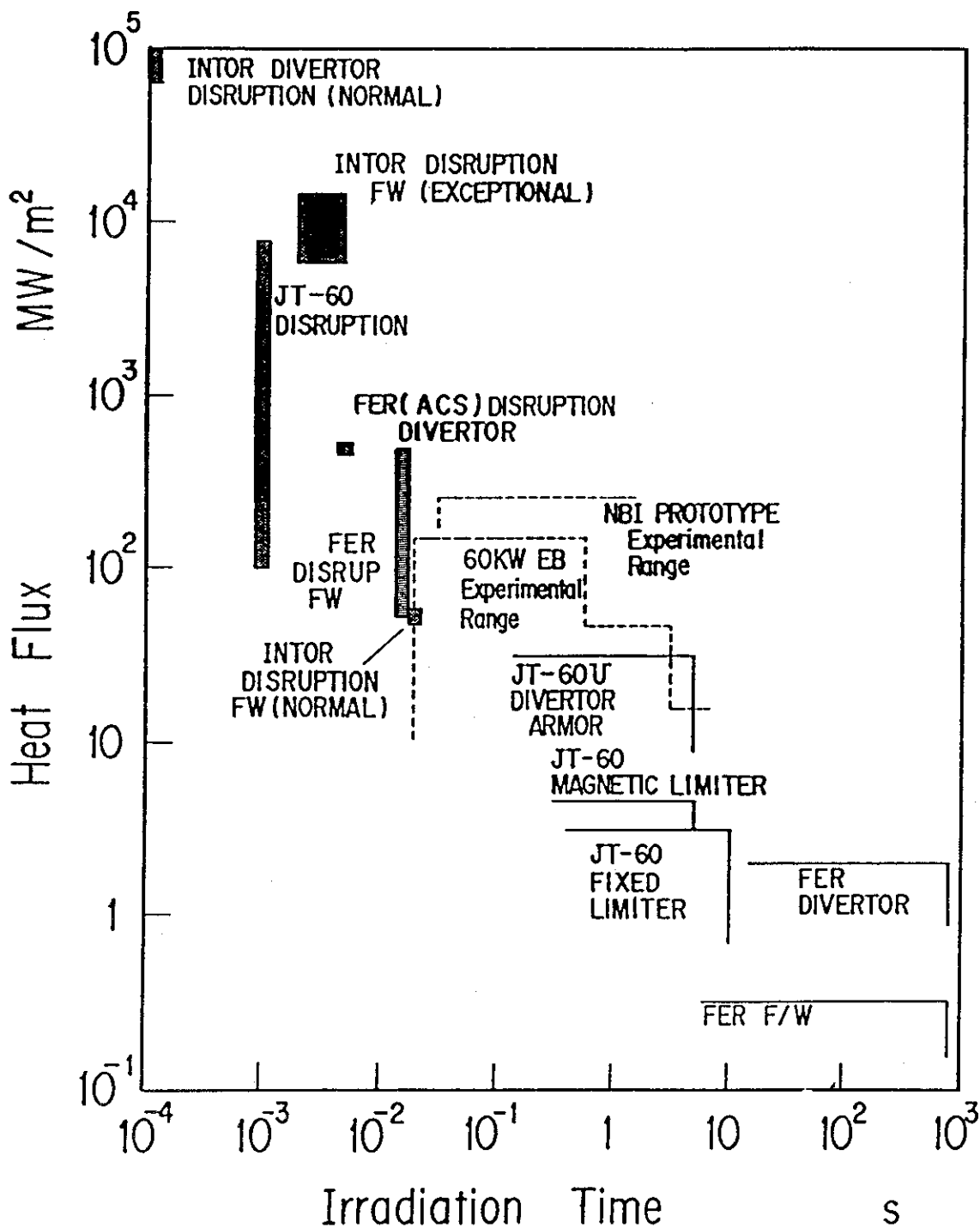
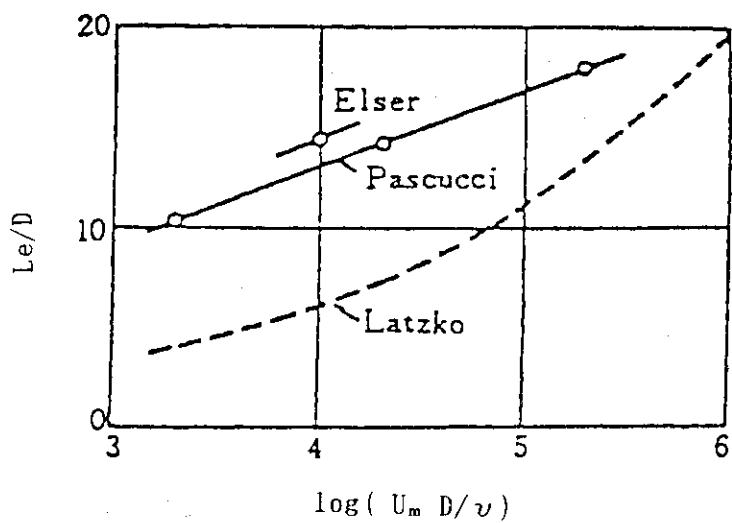


Fig. 3.1.3 Relations between heat flux and duration in tokamaks and testing facilities⁵⁾



Le : Length of entrance region

D : Hydraulic diameter of coolant channel

U_m : Mean velocity of coolant

ν : Dynamic viscosity of coolant

Fig. 3.1.4 Length of entrance region for turbulent flow velocity⁸⁾

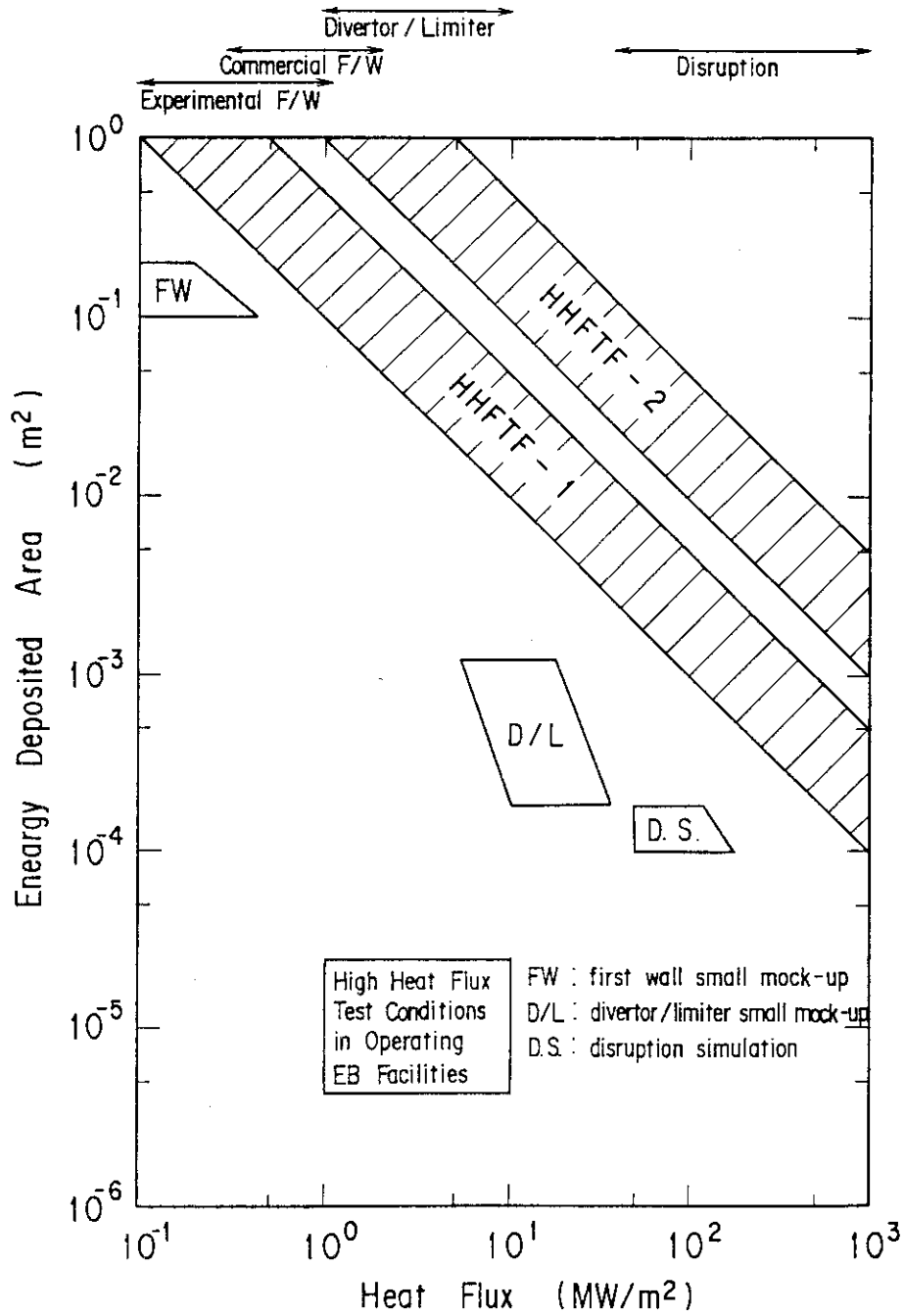


Fig. 3.1.5 Heat flux and energy deposited area in test facilities
 HHFTF-1 : High Heat Flux Test Facility - 1
 (Disruption Heat Load Test Facility)
 HHFTF-2 : High Heat Flux Test Facility - 2
 (Large Area Heat Load Test Facility)

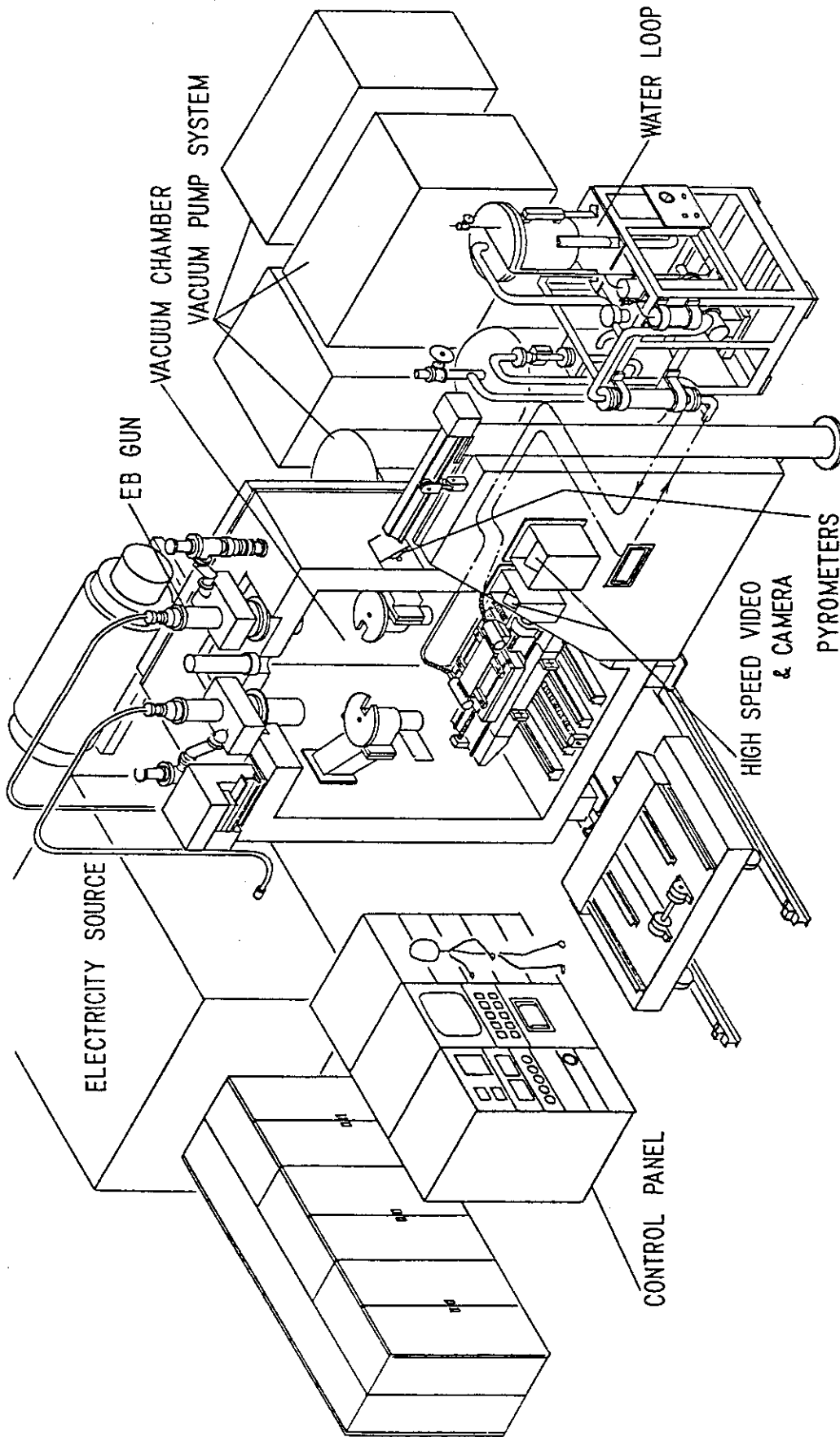


Fig. 3.1.6 High heat flux test facility

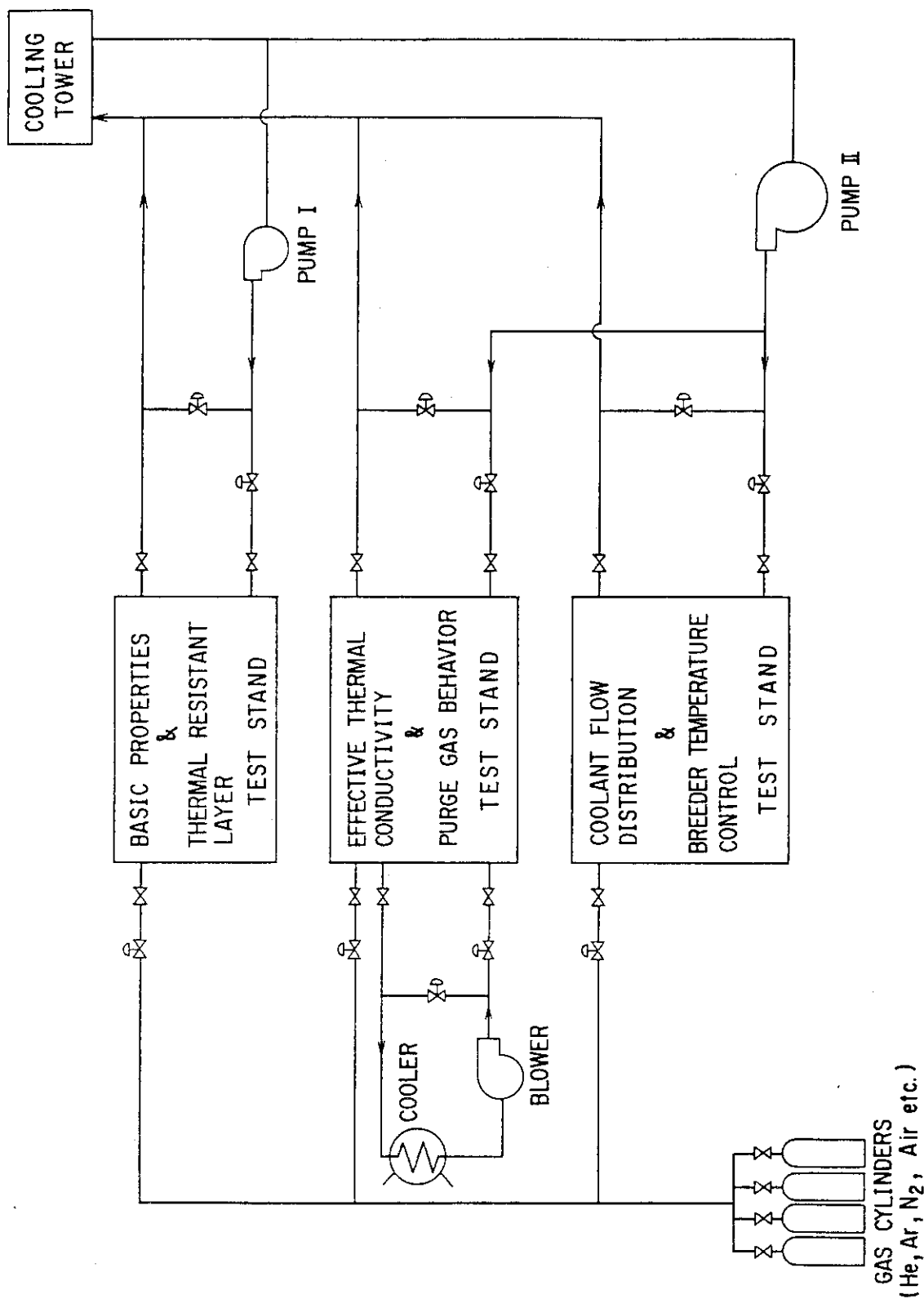


Fig. 3.2.1 Flow diagram of thermal-hydraulic test facility

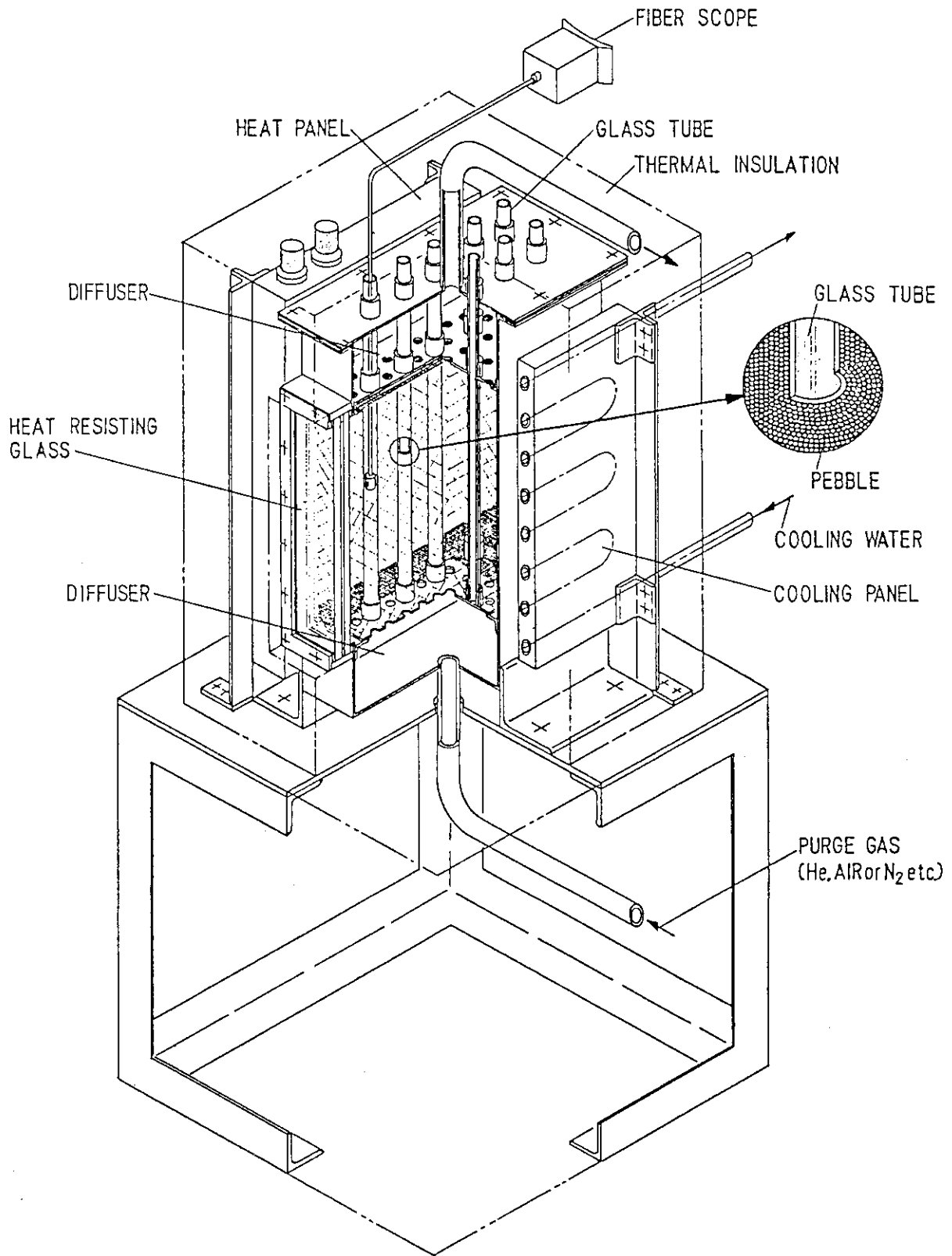


Fig. 3.2.2 Purge gas behavior test equipment

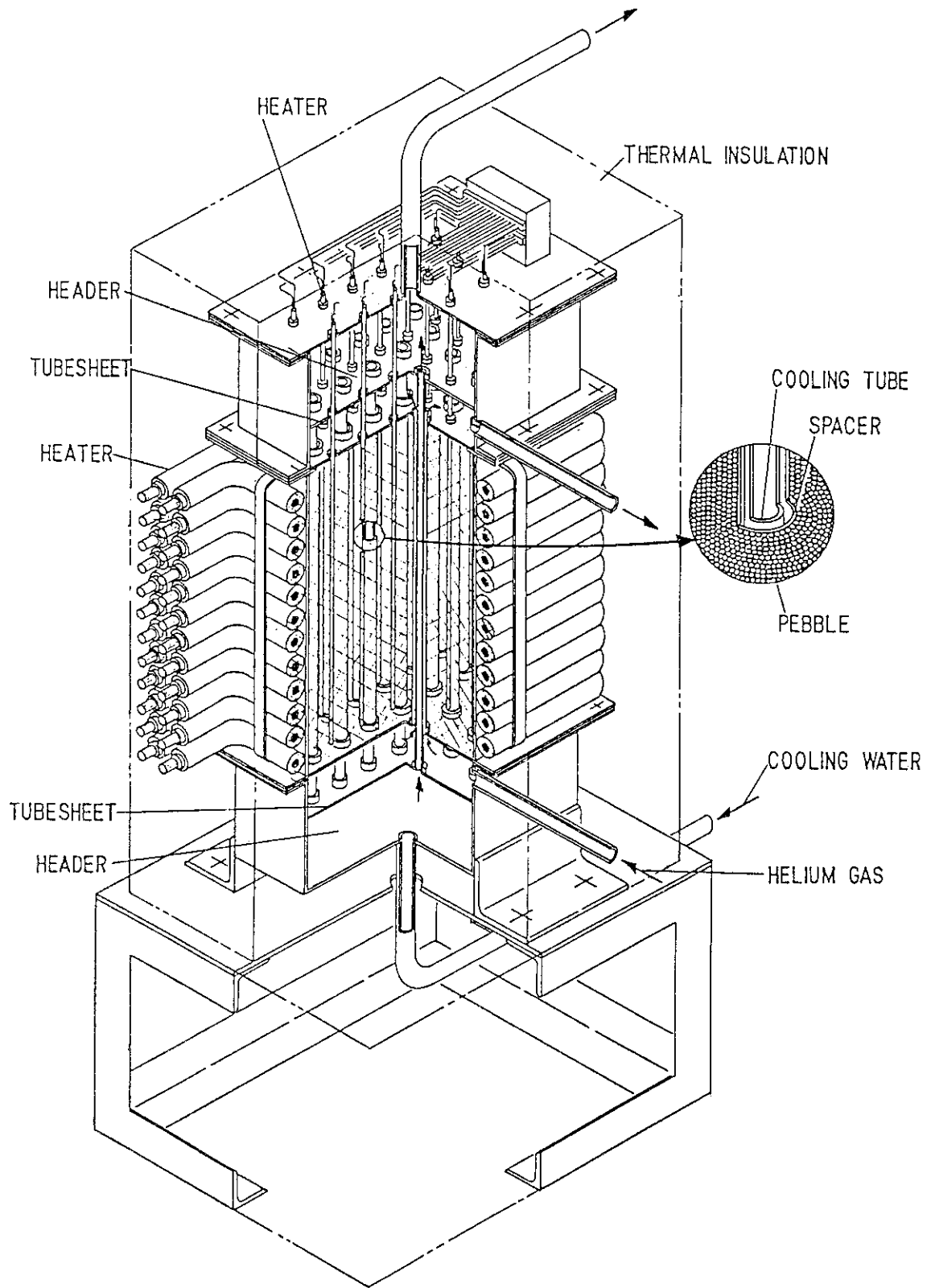


Fig. 3.2.3 Breeder temperature control test equipment

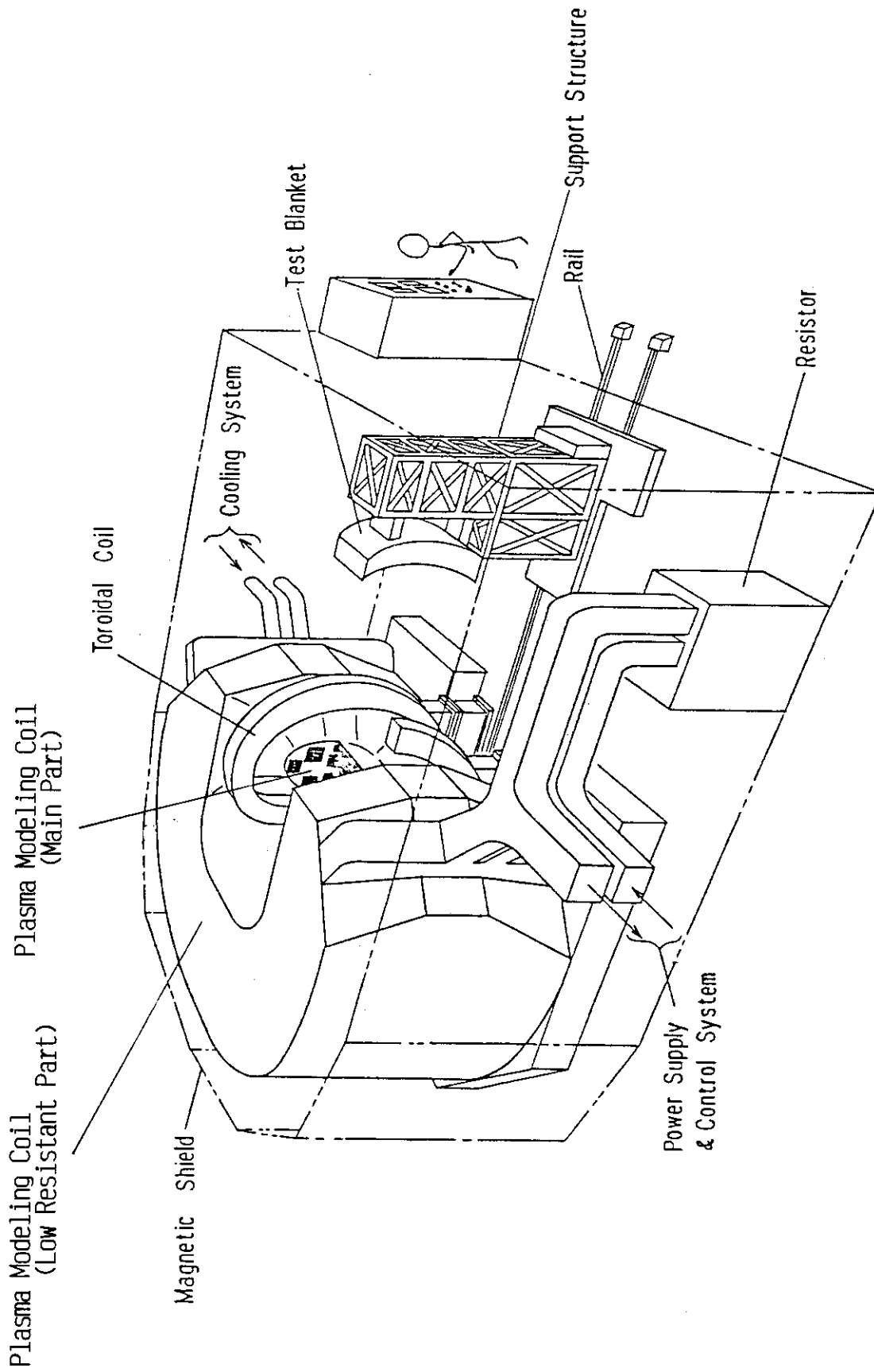


Fig. 3.3.1 Concept of electromagnetic force R&D device

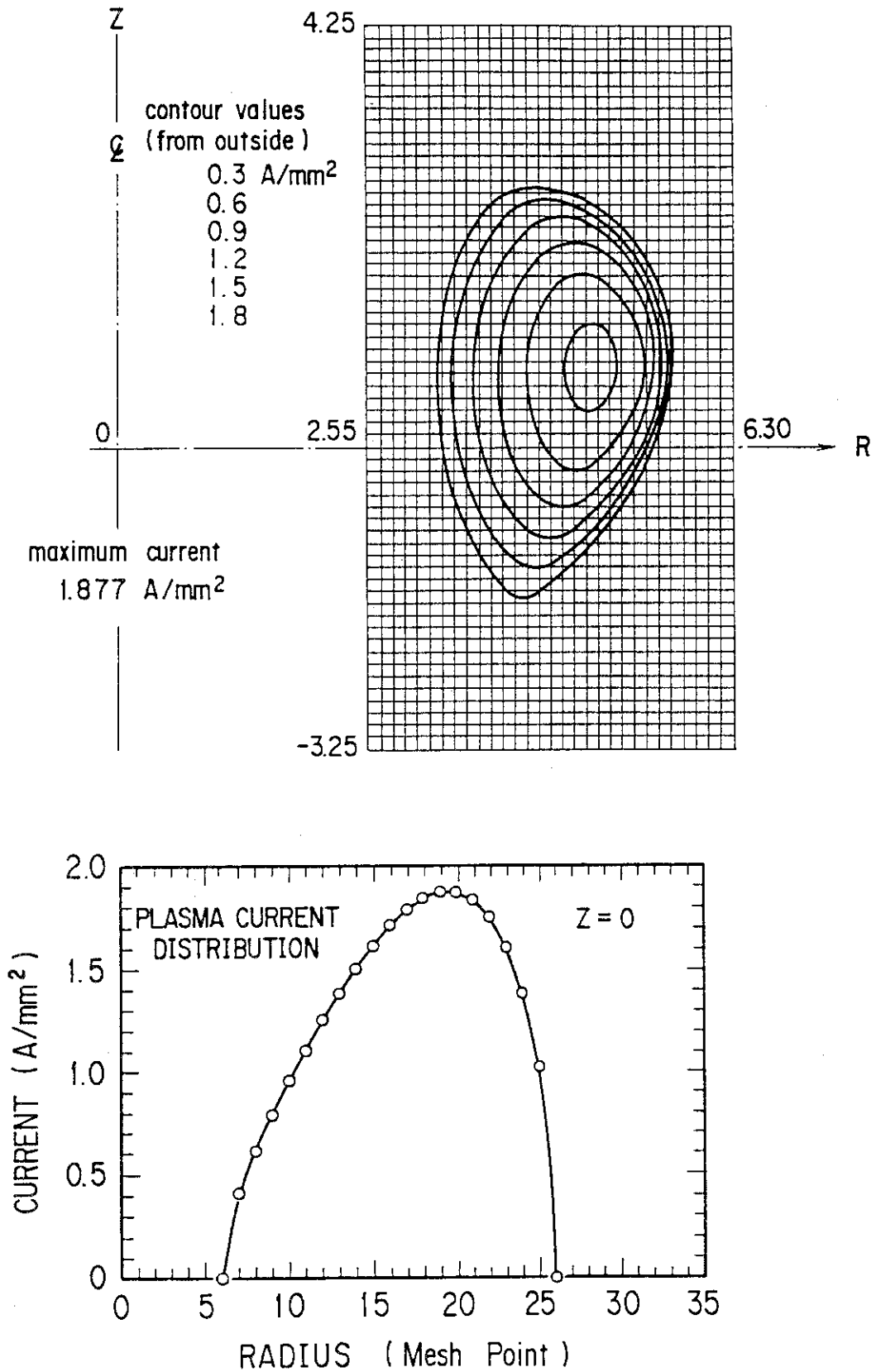


Fig. 3.3.2 Example of plasma current distribution

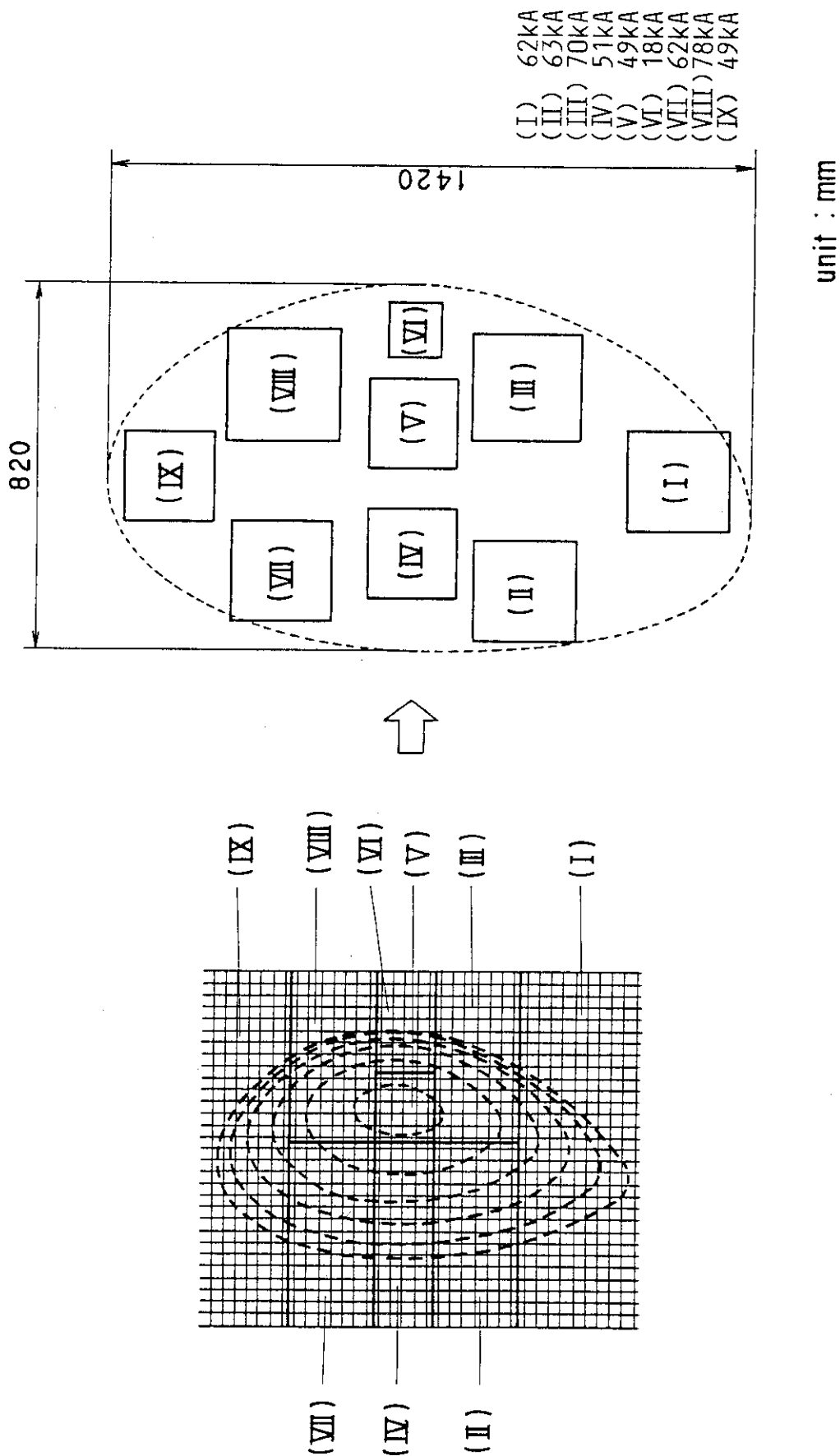


Fig. 3.3.3 Division of plasma current

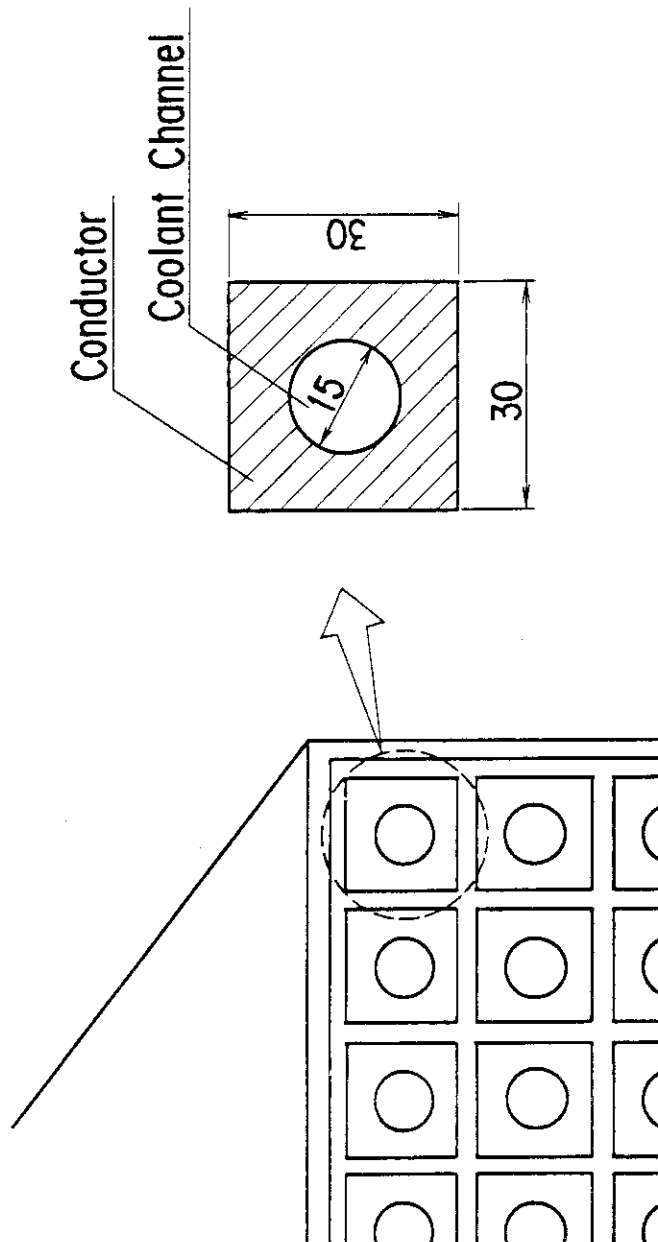


Fig. 3.3.4 Concept of plasma modeling coil

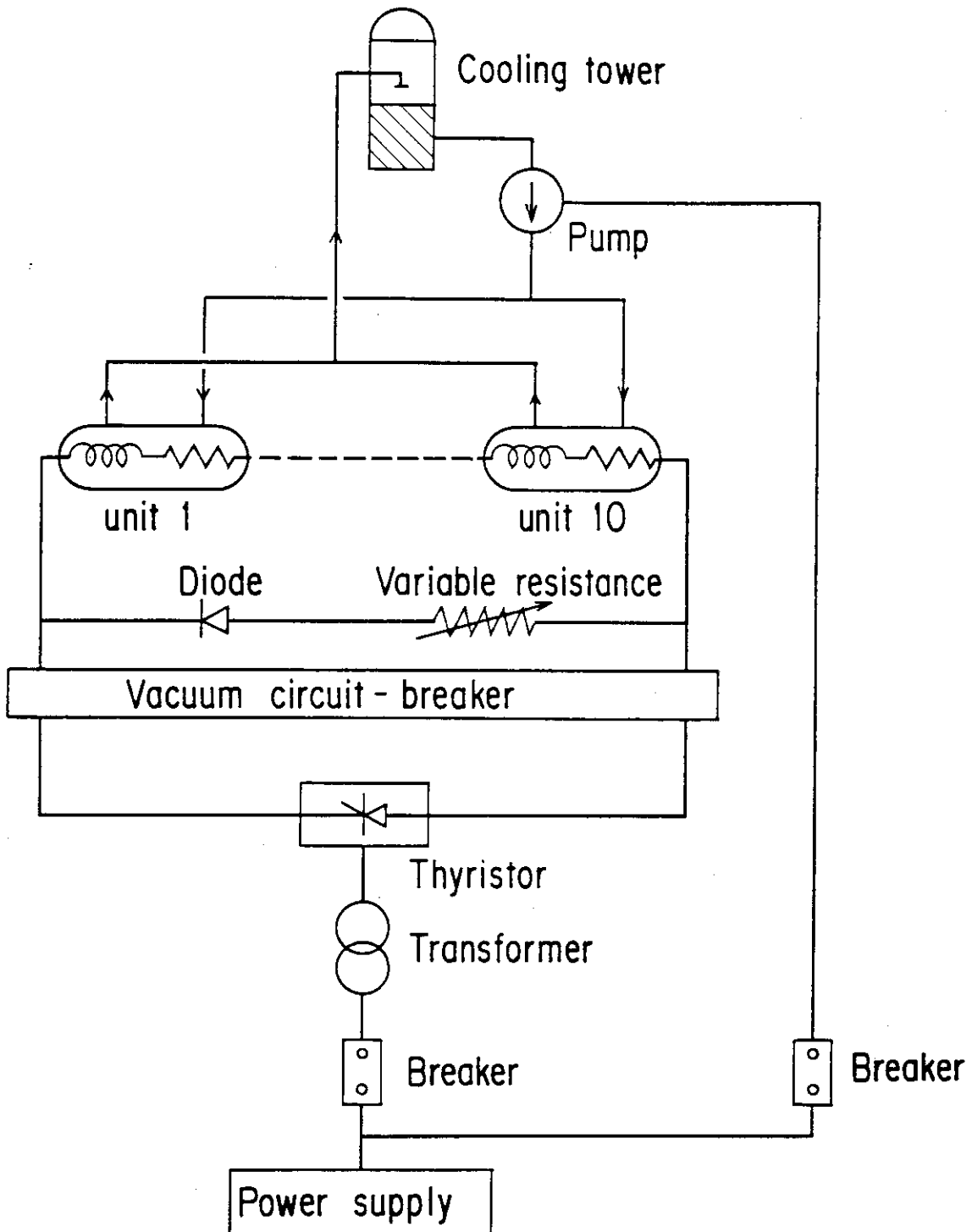


Fig. 3.3.5 Schematic diagram of plasma modeling coil

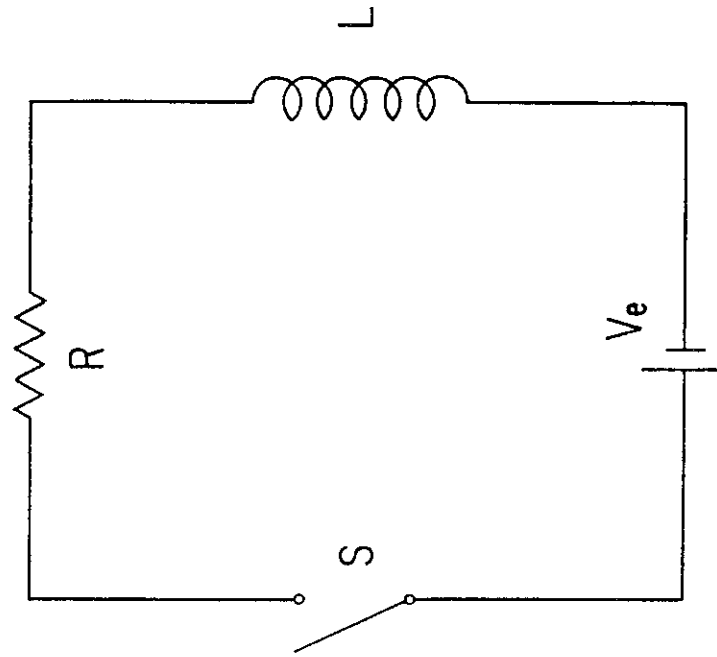


Fig. 3.3.7 R-L circuit

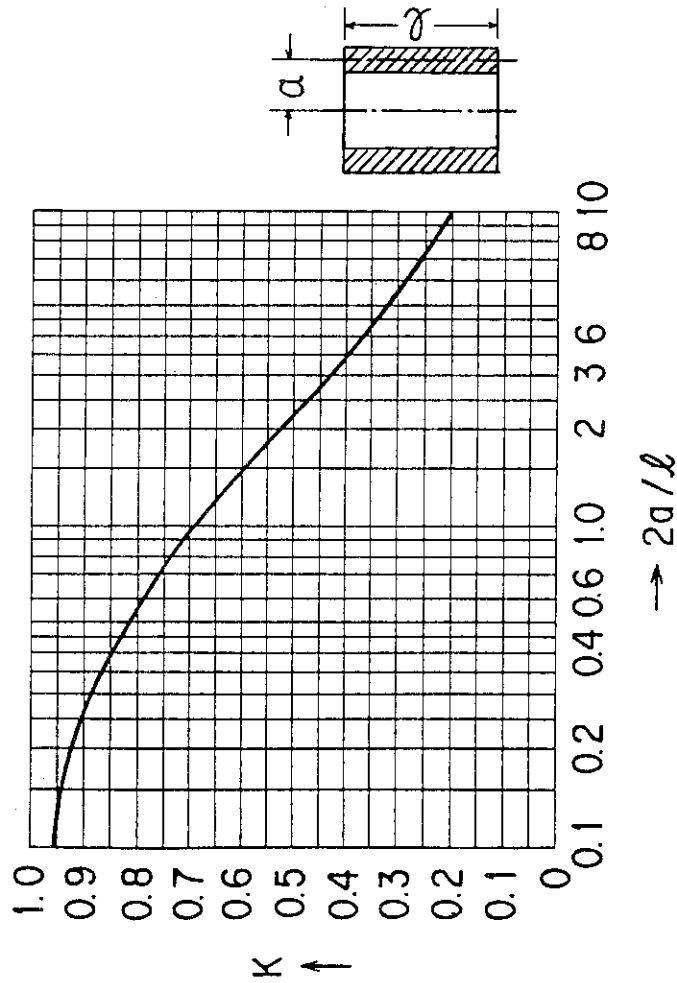


Fig. 3.3.6 Nagaoka factor K

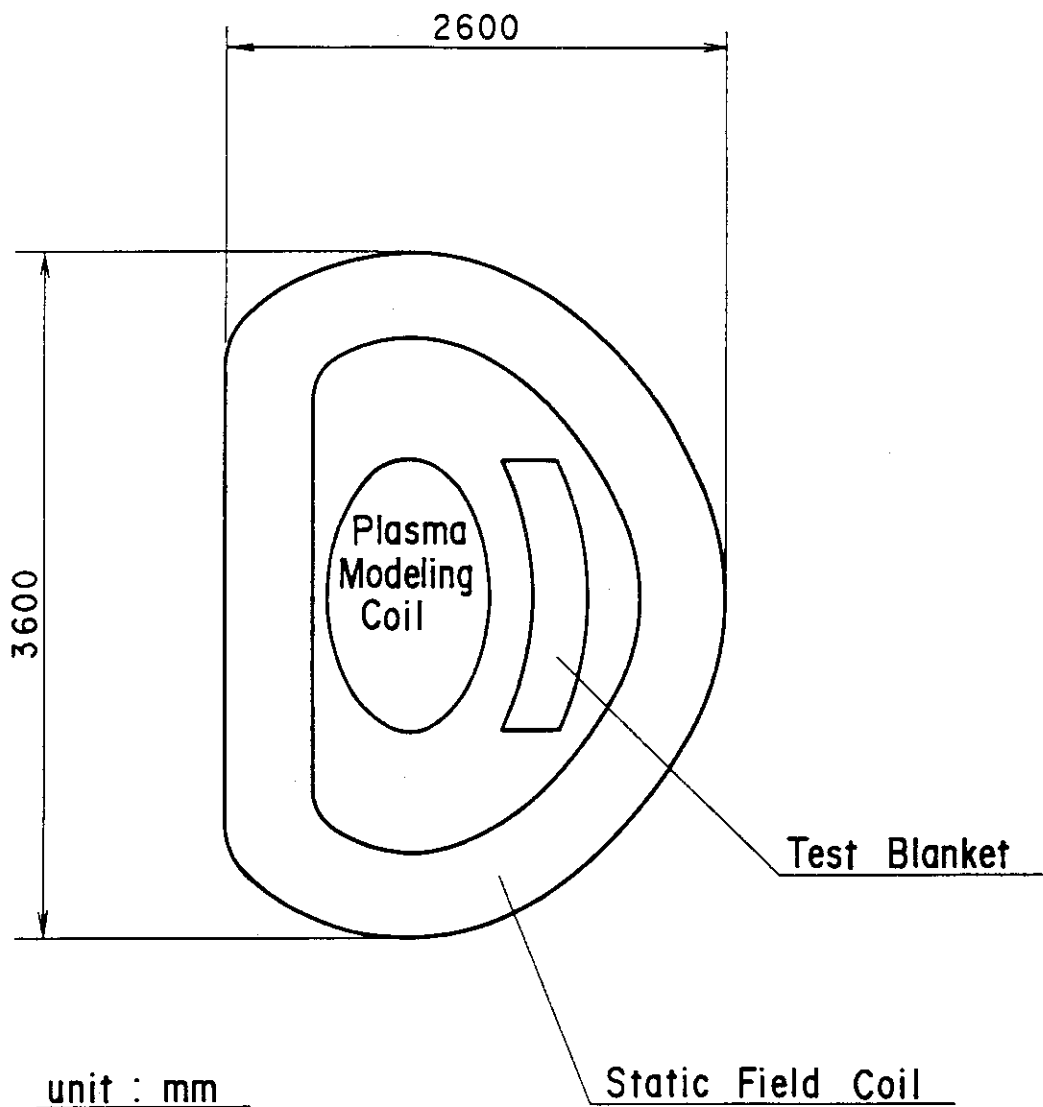


Fig. 3.3.8 Location of test blanket and static field coil

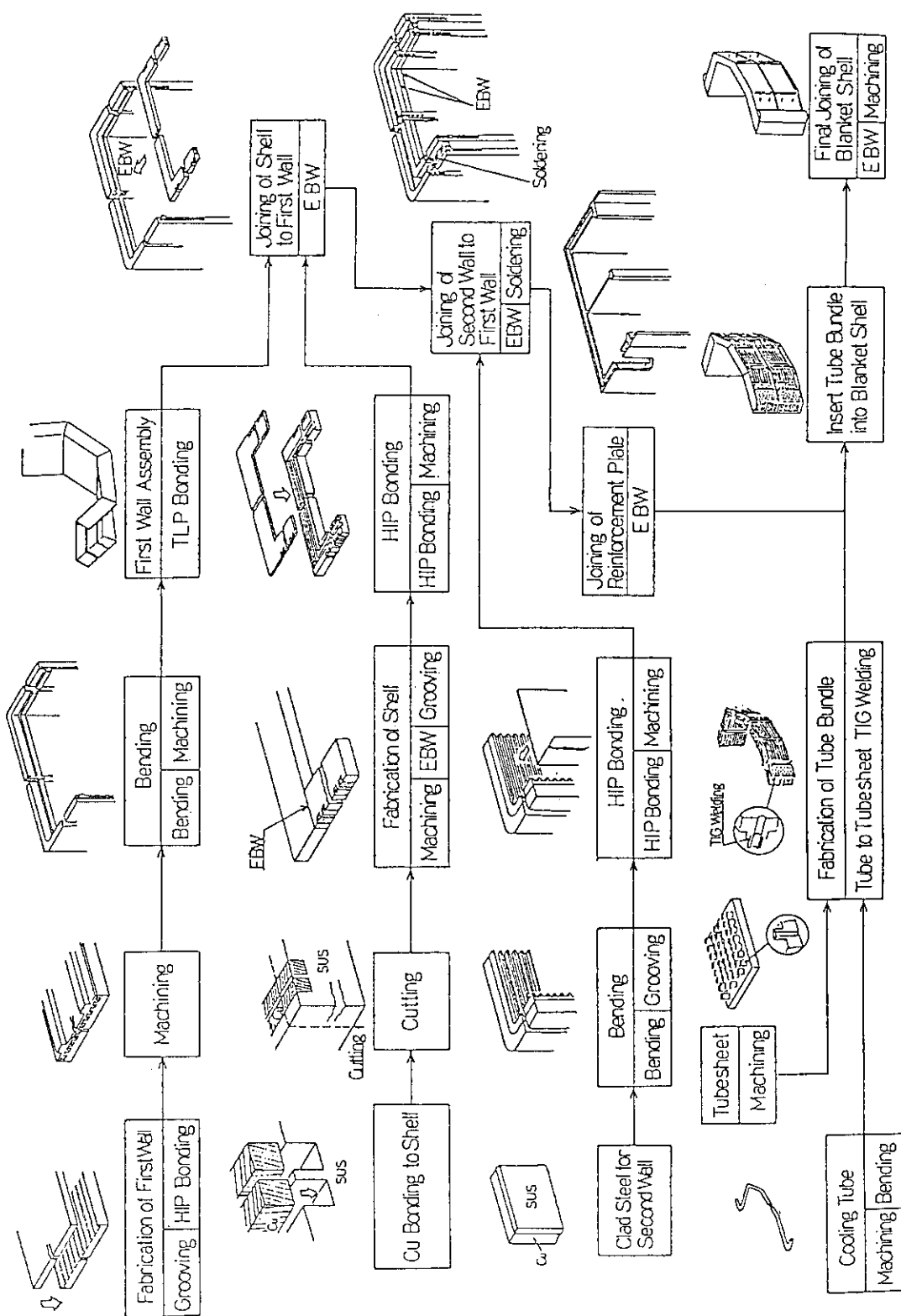


Fig. 3.4.1 Fabrication and assembling process of blanket

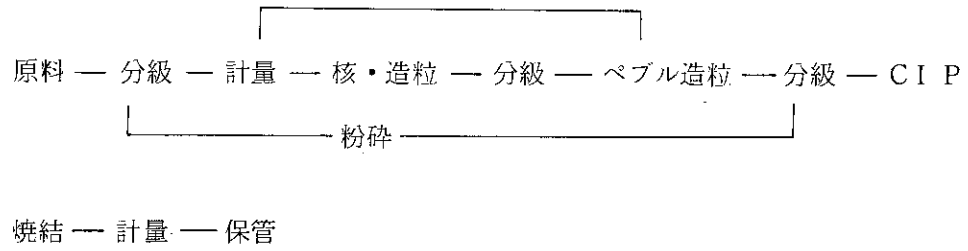


Fig. 3.4.2 Production process of Li₂O small pebbles

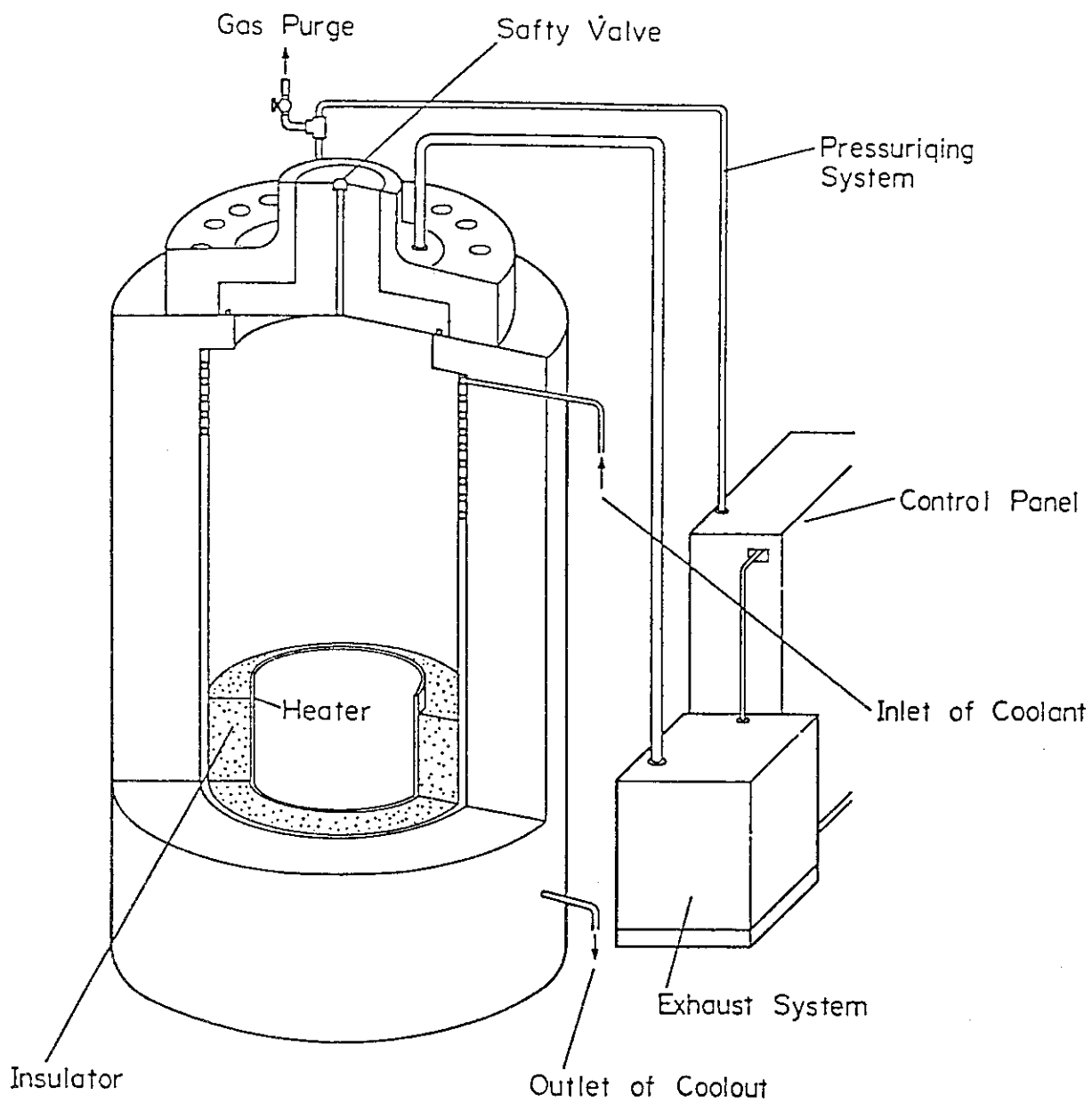


Fig. 3.4.3 HIP equipment

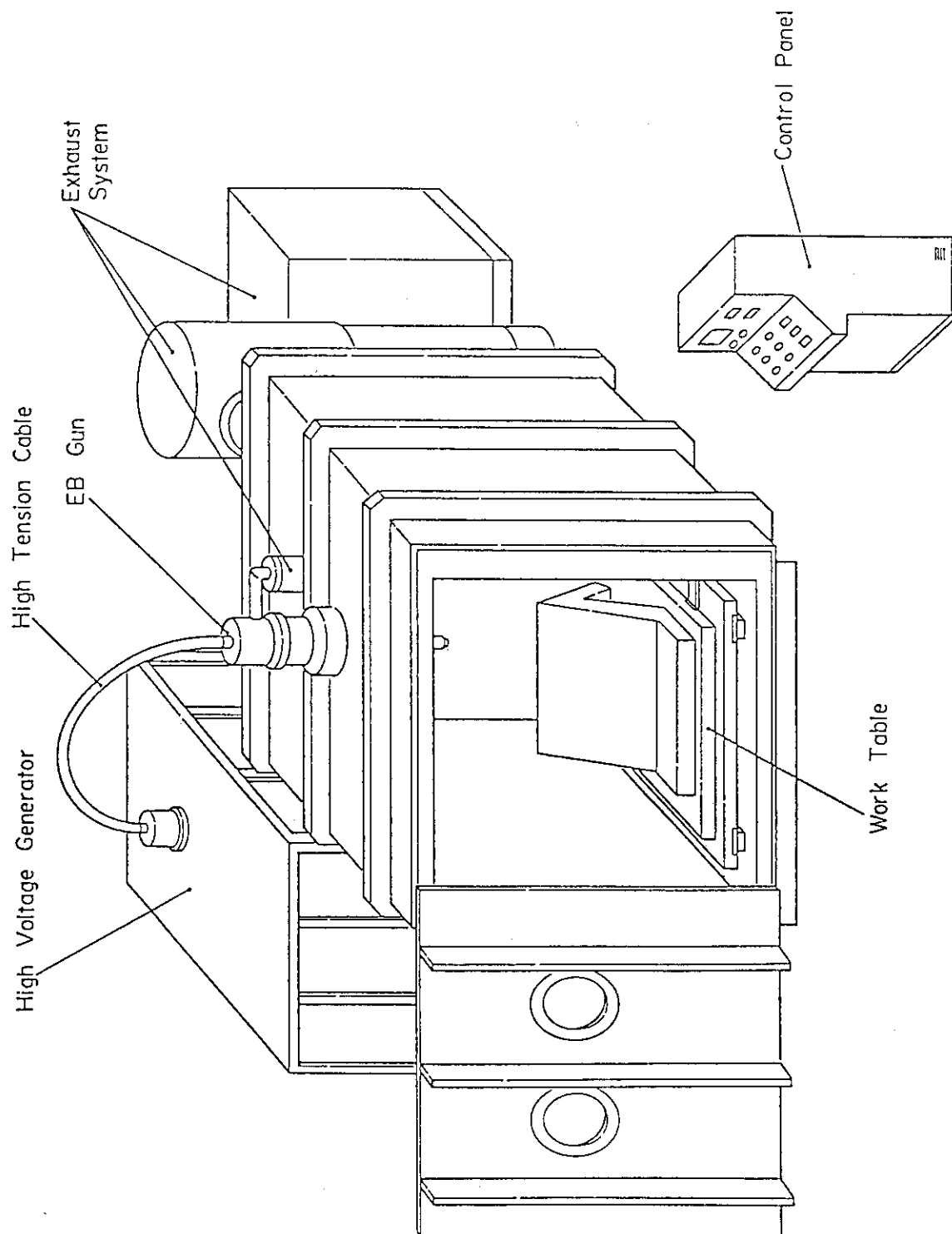


Fig. 3.4.4 EBW equipment (Full vacuum type)

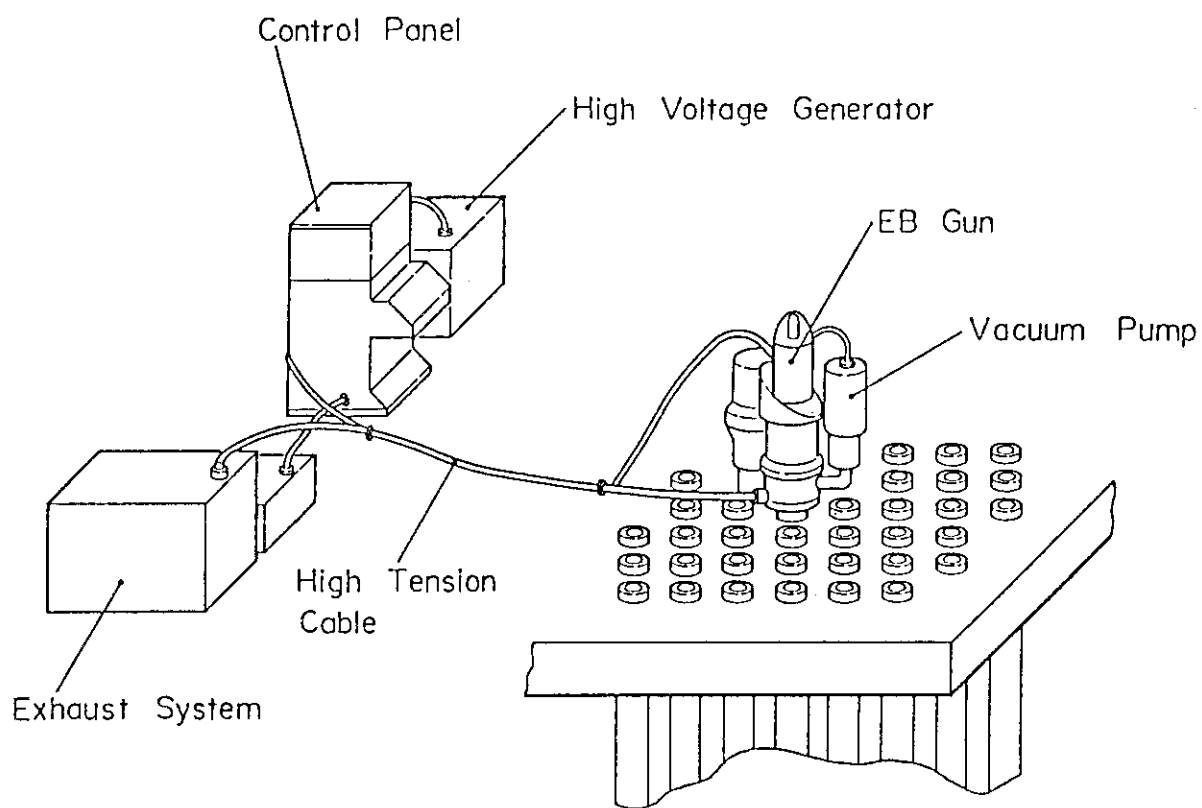


Fig. 3.4.5 EBW equipment (Partial vacuum type)

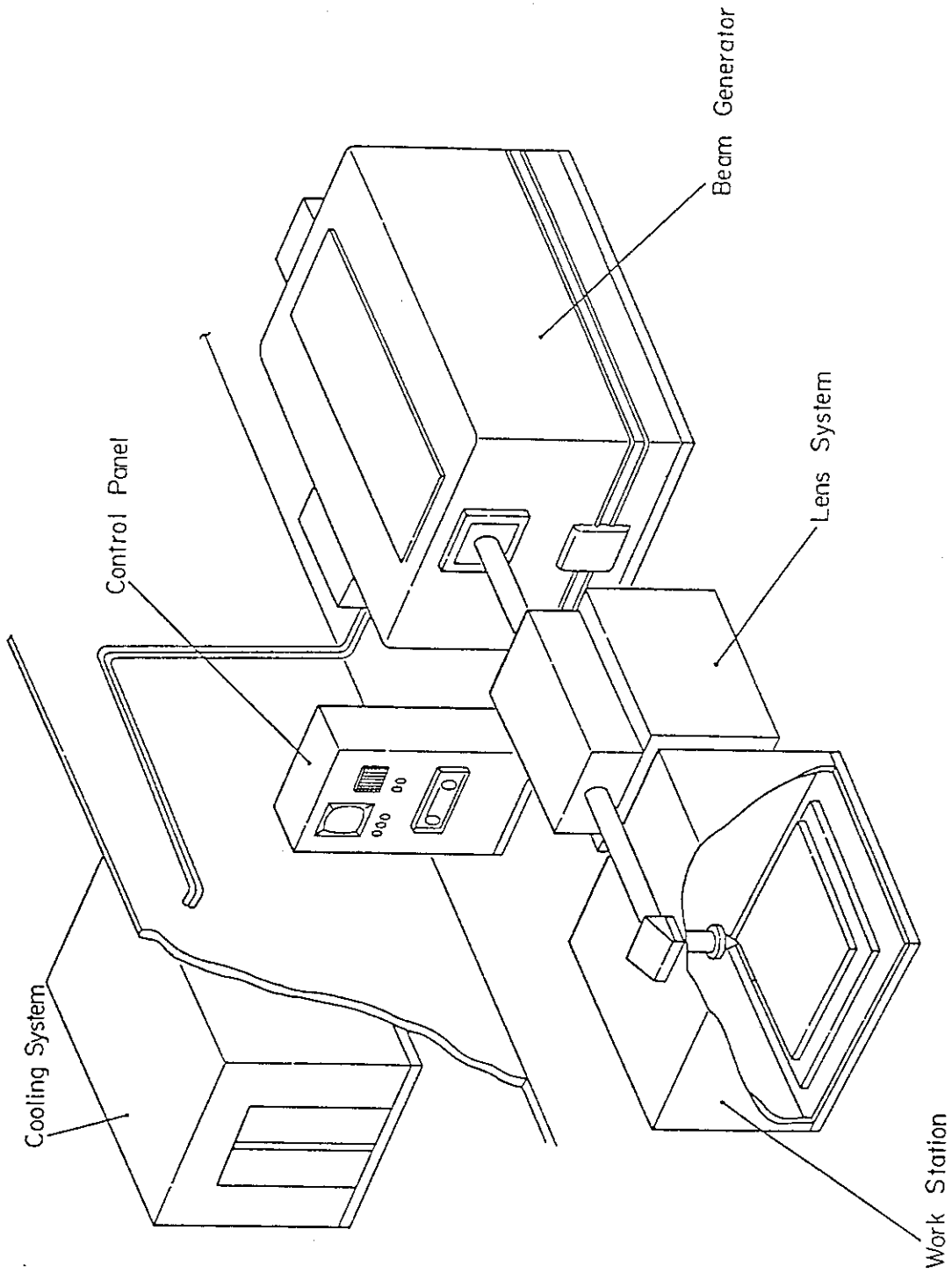


Fig. 3.4.6 Laser welding equipment

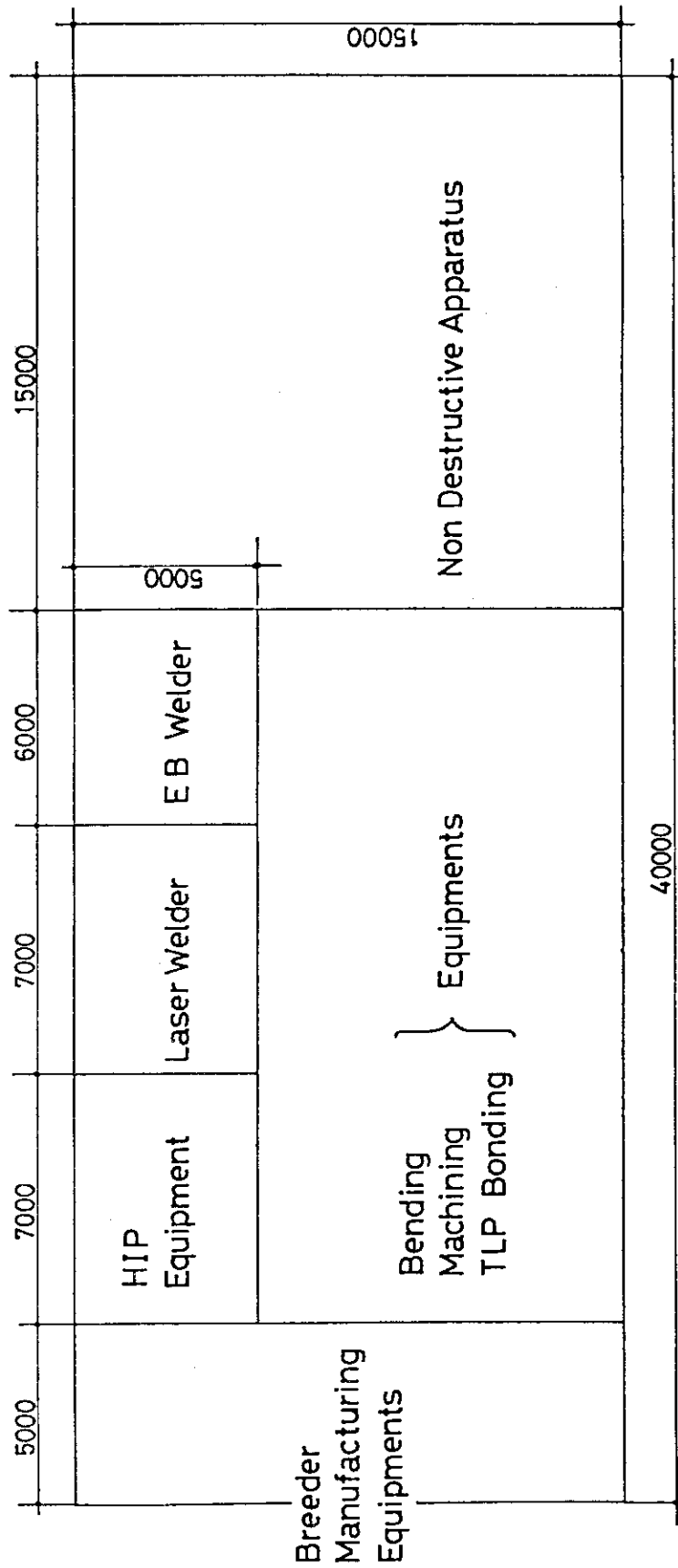


Fig. 3.5.1 A ground plane of blanket fabrication equipments

4. 試験設備に関する重要課題の検討

4.1 増殖材温度制御に関する検討

4.1.1 体積発熱模擬方法の検討

増殖材の核発熱は、固体増殖材ブランケットの伝熱・流動特性、熱・構造特性に直接関与する重要な因子である。伝熱・流動試験設備および健全性試験設備では、中性子による増殖領域の体積発熱を模擬することが必要であろう。体積発熱の模擬方法として可能性のある方法を、Table 4.1.1 に示す。

一方、核分裂炉に試験体を設置し、核分裂中性子との核反応を利用する方法は、実際の核反応による発熱であること、ブランケットと同一の材料構成とできること等のメリットがある。反面、原子炉の利用可能性、生成トリチウム取り扱い、放射性廃棄物の生成等の問題がある。また、核融合炉と核分裂炉の中性子スペクトルの違いによる特性の差に、対応することが必要である¹⁾。

(1) 化学反応熱による体積発熱の模擬

核融合ブランケットの増殖材での核発熱を化学反応の反応熱によって模擬した試験を行うことにより、ブランケット内の熱流動特性を把握可能かを検討する。

化学分野におけるガスの反応装置（たとえばアンモニアの酸化反応装置等）には“固定層触媒反応装置”が一般的に使用されている。この反応装置には種々の構造があるが、Fig. 4.1.1 に示すように内部に冷却管が配置された多管熱交換機構造の容器内に、小径の触媒粒子を充填した構属の装置も使用される。反応ガスは容器入口から供給され、触媒で反応して反応熱を生ずる。反応熱は冷却管により除熱される。触媒粒子内では、反応ガスが触媒の多孔性担体中を拡散しながら、活性点で反応し、体積発熱が生じている。従って固定層触媒反応装置の熱挙動は、ブランケット容器内に冷却管が配置されて、増殖材で体積発熱を生じているブランケットの熱挙動と類似している。そこで、この固定層触媒反応装置を使用した炭化水素ガスの酸化反応（Table 4.1.2 に代表的な反応例を示す。）による反応熱等を利用してブランケット内の熱流動特性を模擬することが考えられる。

しかしながら、化学反応による反応熱は核発熱と異なる種々の特性を有する。たとえば、反応速度は反応ガス濃度と温度等に依存するため、これに伴い発熱量もこれらの条件に依存する。このため、発熱分布の調整が容易でない。また、ブランケットを模擬するためには、触媒担体に増殖材料を使用することが望ましいが、後述するよういくつかの問題がある。そこで、ブランケット温度（～400℃）で反応を生ずるメタンの酸化反応を例にとり、ブランケットを模擬する上での問題点を検討してみた。Table 4.1.3 にメタンの酸化反応の特性を示す。

1) 増殖材の模擬

通常、触媒は多孔性のセラミック（メタン酸化の場合アルミナ等）の粒子を担体とし、少量の貴金属を担体中に担持させることにより製造する。この担体に増殖材料（酸化リチウム等）を使用する触媒の製造が可能ならば、模擬試験の模擬試験体に増殖材料を使用できるこ

ととなる。しかし、この触媒の製造には、独自の研究開発が必要であり、また、増殖材に必要な量の触媒量を担時可能か否かも不明である。従って現状では、試験体に増殖材を使用することは困難であり、アルミナ粒子等で模擬することが考えられる。

2) ブランケット内の発熱率分布の模擬

化学反応速度は、温度に対して指数関数的な依存性を示すとともに、反応ガスの濃度に依存する（ n 次反応で反応物濃度の n 次に比例する）。従って反応速度は反応量に伴う発熱率に依存することとなる。本模擬装置の場合には、冷却管付近で温度が低いため発熱率が小さく、冷却管から離れるに従い発熱率が高くなることが考えられる。また、反応に伴って反応物濃度が低下するため、反応量は流れ方向に指数的に減少する。

メタンの酸化反応の場合、 500°C と 600°C では約14倍の反応速度比となる。（反応速度比 $= R(600^{\circ}\text{C})/R(500^{\circ}\text{C}) = \text{Exp}(E/R(1/500^{\circ}\text{C} - 1/600^{\circ}\text{C}))$ E : 活性化エネルギー R : ガス定数）

また、反応が1次反応とすると濃度変化に伴い、反応量は指数的に低下する。

3) 増殖材粒子内の発熱率分布の模擬

核発熱の場合は、増殖材粒子内に比較的均一の発熱率分布が生ずる。これに対し、化学反応の場合は反応ガスは反応を生じながら触媒粒子内部に拡散していくので、粒子表面の発熱率に比較して内部の発熱率は極めて小さくなることが考えられる。

4) ガス流動特性の模擬

模擬装置内の化学反応による全発熱量は、供給する反応ガス流量に依存する。ブランケットの発熱率($10\text{W/cc} \sim 0.5\text{W/cc}$)に対応する発熱を起こさせるためには、これに相当する反応ガスの供給が必要となる。ブランケット内には小流量（空塔速度で $\sim 1\text{cm/s}$ 程度）のスイープガスを流すこととしているのに対して、化学反応による模擬装置では、多量の反応ガスを供給せねばならないため、ブランケットのガス流動条件の模擬が困難となる。

メタン酸化反応の場合、供給ガスをメタン1%（爆発限界5.3%）含有Airとし、流れ方向10cmの領域でブランケットの発熱率を達成するとする。このときの必要供給ガス流速は $260 \sim 10\text{cm/s}$ となる。

以上述べたように、化学反応の反応速度は種々のパラメータ（温度、反応ガス濃度、反応ガス流量、触媒）に依存するため、発熱率分布の調整は容易でない。従ってブランケットのような大きな体系内の核発熱率分布に相当する分布を、反応熱により正確に模擬することは事実上困難となる。

(2) ヒータ配列による体積発熱の模擬

増殖領域の体積発熱を、シースヒータ等の発熱体を適切な位置に配列し、類似した温度分布を発生させる方法は、入力した電力から発熱量を精度良く評価でき、ヒータ配列を調整することによってブランケット内の巨視的な発熱率分布をヒータ出力や本数を調整することである程度模擬できる。ただし、ヒータ出力、ヒータ径、ヒータ位置等を変えた2次元熱解析により適切な条件を選定する必要がある。Fig. 4.1.2に核融合中性子による核発熱条件と、ヒータによる模擬条件での温度分布の解析結果の例を示す²⁾。図よりわかるようにヒータの適切な配列によって、核反応による増殖領域の温度分布と同等の温度分布を再現することができる。しかし、

特に冷却管近傍での温度分布に差があること、ヒータの設置によりその近傍での充填率が減少すること、ヒータシースの温度から模擬できる増殖領域の最高温度が制限されること等の問題点がある。このため、本方法で実ブランケット規模のモックアップに対する体積発熱模擬を行うのは困難であるものと考えられる。小規模の伝熱・流動試験体に対しては本模擬方法を適用することが可能であろう。

(3) 高周波による体積発熱の模擬

高周波による加熱法として、金属体の渦電流損を利用する誘導加熱と誘電体の誘電損を利用する誘電加熱の2種類がある。

誘導加熱は加熱される物質が誘電体に限られること、Fig. 4.1.3 に示すように浸透深さが限定されることが問題であり、増殖ブランケット模擬試験体の加熱法としては不適當であろう³⁾。

一方、誘電加熱は固体増殖材セラミック(Li₂O, LiAlO₂ etc.) 自体を発熱させることができること、内部まで様な発熱状態が得られること等の利点があり、増殖ブランケット模擬試験用の熱源として有望である。しかし、容器壁に金属を使用できないこと、装置(クライストロン等)の大型化、高コスト価の可能性が高いこと等の問題があり、採用する場合は十分な検討が必要である。

4.1.2 増殖領域有効熱伝導率に及ぼすガス流速の影響

固体増殖材ブランケットを開発する上で、増殖材ペブルが充填されている領域の有効熱伝導率の値を正確に明らかにしておく必要がある。有効熱伝導率の取得を目的とした実験および実験装置については3.2節で記述したように、流体静止状態かつ温度一様の状態で実験を行なうのが最も簡便で、高精度の測定が可能である。しかし、パージガスは生産されたトリチウムの回収のためにゆっくりではあるが循環していること、増殖領域に存在する温度分布のために自然対流が生じること、トリチウム回収用パージガスが冷却材を兼ねる(He直接冷却型)ブランケットも考えられていることから、ガスの流動が増殖領域の有効熱伝導率に大きく影響するとすれば、これを考慮した実験が重要となる。このため、増殖領域の有効熱伝導率に及ぼすガス流速の影響について検討した。

(1) 有効熱伝導率の計算式

固体ペブルと気体の混合充填層の有効熱伝導率の計算式は次のように与えられている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

(i) 流体静止時

$$\lambda_e^0 = \lambda_g \left[\epsilon \left(1 + \frac{\alpha_{rv} D_p}{\lambda_g} \right) + \frac{1 - \epsilon}{\frac{1}{\phi} + \frac{\alpha_{rs} D_p}{\lambda_g}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda_s} \right] \quad (4.1-1)$$

ここで、

$$\alpha_{rs} = 0.2270 \left(\frac{e_m}{2 - e_m} \right) \left(\frac{T + 273}{100} \right)^3$$

$$\alpha_{rv} = \frac{0.2270}{1 + \frac{\epsilon}{2(1 - \epsilon)} \frac{1 - e_m}{e_m}} \left(\frac{T + 273}{100} \right)^3$$

さらに,

$$\phi = \phi_1, \quad \varepsilon \geq 0.476$$

$$\phi = \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2) \left(\frac{\varepsilon - 0.260}{0.260} \right), \quad 0.476 \geq \varepsilon \geq 0.260$$

$$\phi = \phi_2, \quad 0.260 \geq \varepsilon$$

ϕ_1, ϕ_2 は λ_s / λ_g から Fig. 4.1.4⁴⁾ により決定する。

$$\lambda_w^0 = \lambda_g \left[\varepsilon_w \left(1 + \frac{\alpha_{rv} D_p}{\lambda_g} \right) + \frac{1 - \varepsilon_w}{\frac{1}{\frac{1}{\phi_w} + \frac{\alpha_{rs} D_p}{\lambda_g}} + \frac{\lambda_g}{3\lambda_s}} \right] \quad (4.1-2)$$

ϕ_w は λ_s / λ_g から, Fig. 4.1.4 により決定する。

(ii) 流体流動時

$$U_0 = \frac{G}{r A} \quad (4.1-3)$$

$$Re = \frac{U_0 D_p}{\nu} \quad (4.1-4)$$

$$\lambda_e = \lambda_e^0 + \lambda_g \psi \beta Pr Re \quad (4.1-5)$$

$$\lambda_w = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w D_p} + \frac{1}{2\lambda_e}} \quad (4.1-6)$$

ただし,

$$\frac{\alpha_w D_p}{\lambda_g} = \frac{\alpha_0 D_p}{\lambda_g} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{\alpha_w^* D_p}{\lambda_g}} + \frac{1}{\psi_w Pr Re}}$$

さらに,

$$\frac{\alpha_w^0 D_p}{\lambda_g} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_w^0 / \lambda_g} - \frac{1}{2\lambda_e^0 / \lambda_g}}$$

$$\frac{\alpha_w^* D_p}{\lambda_g} = C Pr^{1/3} Re^{1/2}$$

$C = 2.6$; 液

$C = 4$; ガス

$\psi_w \sim 0.054$

[記号]

λ_e^0 : 流体静止時の有効伝導率 (bulk) [W/mK]

λ_g : 流体の熱伝導率 [W/mK]

λ_s : 固体の熱伝導率 [W/mK]

- ϵ : 空間率
 D_p : 粒子径 [m]
 e_m : 粒子表面の輻射率
 T : 温度 [°C]
 λ_w^0 : 流体静止時の有効熱伝導率 (壁付近) [W/mK]
 ϵ_w : 壁付近の空間率 (= 0.7)
 U_0 : 見かけの流速 [m/s]
 G : 流体重量流量 [kg/s]
 γ : 流体比重量 [kg/m³]
 A : 見かけの流路面積 [m²]
 ν : 流体動粘性係数 [m²/s]
 P_r : 流体プラントル数
 λ_e : 流体流動時の有効熱伝導率 (bulk) [W/mK]
 $\psi\beta$: ≈ 0.1 と仮定
 λ_w : 流体流動時の有効熱伝導率 (壁付近) [W/mK]

(2) 検 討

固体を密度 85% T. D. の Li₂O (1 ケースのみ Be), 流体を圧力 0.1 MPa の He ガスとし, 流体の見かけ流速等を変化させて求めた充填層の有効熱伝導率の計算結果を Table 4.1.4 にまとめた。このうち, ケース 4~8 は温度を 800 °C, 空隙率を 0.3, Li₂O の放射率を 0.3, ペブル径を 3 mm に固定し, 見かけの流速を変化させた場合の影響を検討したものである。実際の増殖ブランケット設計ではページガス流量が小さいため, 見かけの流速は約 2 cm/s あるいはそれ以下となるが, ここでは 0 cm/s ~ 10 cm/s の範囲で変化させた。表より, 10 cm/s 以下の見かけの流速の範囲では, バルクの有効熱伝導率 λ_e , 壁面近傍の熱伝導率 λ_w のいずれも, ガス流速の影響がほとんど表れないことが明らかになった。

次に, 式 (4.1-5) から, 流体静止時に比べて顕著な有効熱伝導率の増加が見られるガス流速を検討した。すなわち, (4.1-5) 第 2 項が, ガス流速の寄与分であり, 流速が 0 の場合には, レイノルズ数 Re が 0 となってこの項は 0 となる。(4.1-5) 式を λ_e^0 で除すると次のようになる。

$$\lambda_e^+ = \frac{\lambda_e}{\lambda_e^0} = 1 + \frac{\lambda_g \psi\beta P_r Re}{\lambda_e^0} \quad (4.1-7)$$

$$\lambda_e^+ - 1 = \frac{\lambda_g \psi\beta P_r D_p}{\lambda_e^0 \nu} U_0 \quad (4.1-7')$$

ここで, $\psi\beta$ は定数であり, λ_g , P_r , ν は He ガスの物性値であること, λ_e^0 は固体と流体の物性値およびペブル径 D_p , 空隙率等が決まれば求まることから, ガス流速に対応する有効熱伝導率の増加分は, 物質の種類, 温度, 圧力, ペブル径, 充填率が同じであれば, 見かけの流速に比例していることがわかる。ちなみに, Table 4.1.4, CASE 8 の条件では, 0.37% であり, 計算結果に一致する。

式 (4.1-7') により, ペブル径, 充填率, 見かけの速度を変化させて求めた気体の流動に伴

う有効熱伝導率の増加率を Table 4.1.5, および Fig. 4.1.5 にまとめた。これらの結果から次のことが明らかになった。

- ① 有効熱伝導率に対する気体流動の影響は流速に比例し、ペブル径が大きいほど、充填率が小さいほど顕著に表れる。
- ② 増殖ブランケット内のパージガス流速として考えられる数 cm/s では、気体流動による有効熱伝導率の増加は 1% 未満であり、無視してもよい。
- ③ 1~5 mm のペブル径に対し、見かけの流速が数 cm/s 以上となると、気体流動の影響が顕著となると考えられる。すなわち、直接冷却型ブランケットの場合、あるいは局所的な高ガス流速が発生する場合にのみ、この効果が重要となる。しかし、これらの場合には気体による熱伝達が主要なメカニズムとなることが推定され、有効熱伝導率の増加は大きな影響を与えないと考えられる。

以上より、増殖領域の有効熱伝導率に対してガス流速は重要な影響を与えないと考えられる。しかし、直接冷却型ブランケット等では熱伝達評価の上で注意する必要がある。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所 臨界プラズマ研究部, 私信
- 2) Abdou, M. A. et al., Technical Issues and Requirements of Experiments and Facilities for Fusion Nuclear Technology, FINESSE Phase I Report Vol. II, UCLA-ENG-85-39 (1985), 4-119
- 3) 高橋勘次郎ほか, 高周波の工業への応用, 東京電機大学出版局(1977), 4
- 4) 日本機械学会編, 伝熱工学資料・改訂第3版(1975), 227
- 5) 同上・改訂第4版(1986), 91
- 6) 化学工学協会編, 化工便覧・改訂第4版(1978), 288

4.2 健全性試験における縮小試験体の効果に関する検討

4.2.1 電磁力試験に対する効果

1986年度 FER 設計におけるテストモジュールを対象として、電磁力試験に対する縮小試験体の効果について検討した。FERにおけるテストモジュールの概念を Fig. 4.2.1 に示す。これに対し、Fig. 4.2.2 および Table 4.2.1 に示すように主半径、プラズマ半径、TF コイルボア径、TF コイル厚さ、テストモジュール大きさ等をスケールファクタ(試験体寸法/実機寸法として定義する)に従い、相似形に縮小する場合を考え、それぞれの場合にテストモジュールに発生する渦電流、電磁力、応力を計算した。ただし、このとき PF コイルによる磁場はないものとし、またプラズマ電流の変化率は一定としている。この変化率は FER でのプラズマ電流(8.7 MA)が線形減衰するとした場合、電流消失までの時間を 100 msec としたことに相当する。

Fig. 4.2.3 に解析モデルを、また Fig. 4.2.4 に解析結果の例を示す。また、Fig. 4.2.5 および 4.2.6 に、それぞれ最大渦電流および最大電磁力の応答を示す。渦電流および電磁力共 20 msec

ではほぼ飽和し、スケールファクタが小さくなるに従い発生する値も低下している。この関係を Figs. 4.2.7 および 4.2.8 に整理して示す。渦電流値は構造体内に生じる渦電流回路に対する抵抗およびプラズマ（模擬コイル）との相互インダクタンスにより変化するが、ここでは、スケールファクタに対し、ほぼ線形に変化する結果となっている。電磁力はスケールファクタのほぼ 2 乗に比例して変化する。ここでは、TF コイルの電流密度を一定と仮定し、断面積がスケールファクタの 2 乗に比例するとしており、このことからコイルの全電流値はスケールファクタの 2 乗に比例する。したがって次式により、上記の渦電流の結果と合わせて、電磁力がスケールファクタの 2 乗に比例することが理解される。

$$B \propto \frac{I_c}{R} \quad (4.2-1)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (4.2-2)$$

ただし、 B ：磁束密度、 I_c ：コイル電流値、 R ：コイル半径、 \mathbf{F} ：電磁力、 \mathbf{J} ：渦電流

電磁力により構造体内に発生する最大せん断応力を Fig. 4.2.9 に示す。最大せん断応力もスケールファクタの 2 乗にほぼ比例し、スケールファクタを $1/3$ とした場合、発生する応力はスケールファクタ 1 のときの約 $1/10$ である。構造体の健全性に対する実証という観点からは、試験体において生じる応力を実機相当のものとして、その健全性を確認することが望ましい。一方、電磁力試験においてこの条件を満足するためには、例えばスケールファクタ $1/3$ の場合には発生する電磁力を上記で考えた値の約 10 倍にする必要がある（応力は電磁力にほぼ比例するものと考えられる）。このためには、電磁力が式 (4.2-2) で与えられることおよび渦電流がプラズマ模擬コイル等との相互関係および試験体の内部要因で決まってしまうことを考えると、プラズマ模擬コイルの電流変化率をより大きくするか、あるいは、TF コイルの磁束密度をあげる必要がある。しかしながら、プラズマ模擬コイルの電流変化率を実際のプラズマディスラプション以上に大きくすることは、技術的に困難と思われ、また、TF コイルの磁束密度の増加に対しても、コストが過大になることが予想される（発生する応力が電磁力にほぼ比例していることおよび式 (4.2-1)、(4.2-2) より、スケールファクタ $1/3$ に対しては、コイル全電流値として上記で考慮した値の約 10 倍が必要）。

以上のこと、および電磁力評価に関しては最近急速に研究が進展し解析コードによる評価の信頼性が向上していることから、電磁力に対しては、コストを過大とするような試験装置を備えるよりも、むしろ、解析による実証を目指すと共に、解析設計手法の検証に利用できる試験装置とすることが一つの有効な方法であると考えられる。

4.2.2 耐圧試験に対する効果

一般に、圧力等の等分布荷重に対しては、構造体の形状を相似形に保って寸法を変化させた場合、すなわちスケールモデルにおいて、圧力が実機と同じであれば、発生する応力も実機と同じとなる。例えば、Table 4.2.2 に示すような等分布荷重が作用する長方形板を考えると、最大曲げ応力はいずれも

$$\sigma_{\max} = \beta \frac{p a^2}{h^2} \quad \text{or} \quad \beta \frac{p b^2}{h^2} \quad (4.2-3)$$

で表わされる¹⁾。ここで、 p ：分布荷重， a, b ：長方形の辺長， h ：板厚， β ：両辺長の比 (a/b) により決まる係数である。試験体形状・寸法が実機と相似になっている場合には、 β および a^2/h^2 あるいは b^2/h^2 は実機の値と同じである。したがって式 (4.2-3) より、圧力を実機と同じ条件とすれば試験体としてのスケールモデルにも実機と同等の応力を生じることになり、これによって健全性の実証を行うことができる。

4.2.3 熱応力試験に対する効果

平板に対し、板の温度が両表面間で T_1 から T_2 に直線的に変化するとき、板のわん曲が完全に阻止されると、次式で表わされる最大応力 σ が板の面表面層に生じる。

$$|\sigma| = \frac{E \alpha (T_2 - T_1)}{2(1-\nu)} \quad (4.2-4)$$

ここで E ：縦弾性係数， α ：線膨張係数， ν ：ポアソン比である。板内での直線的な温度変化は板に表面からの熱流束を与えた場合に対応すると考えることができ、

$$T_2 - T_1 = \frac{q h}{\lambda} \quad (4.2-5)$$

q ：表面熱流束， h ：板厚， λ ：熱伝導率であることから式 (4.2-4) は

$$|\sigma| = \frac{E \alpha}{2(1-\nu)} \cdot \frac{q h}{\lambda} \quad (4.2-6)$$

で表わすことができる。

スケールモデルに対して、実機と同じ材料を使用するとすれば、 E, α, ν, λ は基本的に同一であるから、実機 (suffix として 0 をつけて示す) での応力とスケールモデル (suffix として s をつけて示す) での応力の関係は熱流束 q と板厚 h のみによって表わされることとなる。

$$\frac{|\sigma_s|}{|\sigma_0|} = \frac{q_s h_s}{q_0 h_0} \quad (4.2-7)$$

したがって、スケールモデルに対する試験条件として

$$q_s = \frac{h_0}{h_s} \cdot q_0 \quad (4.2-8)$$

を満足する熱流束 q_s を与えてやれば、実機と同程度の応力を生じると考えられる。しかしながら、以上の検討は、ごく単純な場合を取り扱っており、実際には現象はもっと複雑になると考えられる。

Fig. 4.2.10 に増殖ブランケットの第一壁における熱応力の例を示す²⁾。実ブランケットの第一壁においては、プラズマからの表面熱流束に加え、中性子との反応による体積発熱を生じる。そのため、構造材内の温度分布は単純な直線形とはならない。また、第一壁中には高熱流束除去のための冷却流路が多数設けてあり、このことから第一壁内の温度分布はやや複雑となっている。これらに加え、スケールモデルにおける構造体各部分 (第一壁、側壁、後壁等) の剛性比が温度分布等につれて微妙に変化する。このように熱応力は非常に複雑な現象であり、スケールモデルに対する試験条件を決定するには、上記に示すような考え方を基とし、解析コード等による検討を慎重に行う必要がある。また、熱応力に対してはブランケットの構造的特徴 (第一壁冷却流路、

内部補強板等)の影響を検討できるような構造模擬モデルを使用し、設計手法の検証を行うためのデータを取りつつ、開発を進めていくのも一つの方法と考えられる。

参考文献

- 1) 日本機械学会, 機械工学便覧基礎編 A 4 材料力学, (1984)
- 2) 臨界プラズマ研究部, 核融合実験炉(FER)重要技術課題の検討(昭和59年度), JAERI-M 85-179, (1986.1)

Table 4.1.1.1 Comparison of mock-up techniques for volumetric heat generation

発熱模擬法	化学反応	ヒータ配列	直接通電	高周波利用	分裂炉
概要	適切な固体と気体あるいは気体相互の発熱反応を利用する。	適切な位置にシータ等配置することにより発熱を模擬する。	増殖材を模擬した材料に直接通電することにより発熱させる。	高周波を利用した誘導加熱/誘電加熱を利用する。	核分裂中性子による核反応を利用する。
長所	体積発熱 化学プラントでの実績	簡便, 高信頼性 発熱量は高精度で設定可能 巨視的な発熱率分布に対応したヒータ配列可能	簡便, 高効率 体積発熱(スキニング?) 大容量試験体	体積発熱	指数減衰の体積発熱 実際のブランケットと同じ材料構成
短所	発熱率の調整が困難	局所加熱のため温度分布が異なる ヒータの壁効果により充填に影響 最高温度に制約	増殖材模擬材料が限定される 発熱率分布模擬が困難 絶縁構造等複雑	金属壁が使用不能(誘電加熱) 発熱領域, 増殖材模擬物質が限定される(誘導加熱)	ホット試験 急激な減衰

Table 4.1.1.2 Example of chemical reactions

反 応	反 応 式	反 応 熱 (kcal/mol)	備 考
ガス反応			
メタン酸化	$\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 \xrightarrow{\text{Pt等触媒}} \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	212.8	反応はセラミック（触媒担体）粒子内で生ずる。従って増殖材の模擬物質（セラミック）自体は変化しない。また反応は触媒内で生ずる。
エタン酸化	$\text{C}_2\text{H}_6 + \frac{7}{2}\text{O}_2 \xrightarrow{\text{Pt等触媒}} 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	68.3	
水素酸化	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \xrightarrow{\text{Pt等触媒}} \text{H}_2\text{O}$	23.5	
二酸化イオウ酸化	$\text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \xrightarrow{\text{酸化バナジウム触媒}} \text{SO}_3$	372.8	
固体反応			
カーボンの酸化 (活性炭, グラファイト等)	$\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	94.3	反応により増殖材模擬物質の変化が生ずる。反応は主に固体表面で生ずる。
金属球の酸化	$\text{M} + n\text{O}_2 \longrightarrow \text{M}_n\text{O}_{2n}$	---	

Table 4.1.3 Characteristics of the typical chemical reaction
(Oxidization of Methan)

反 応 式	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
発 熱 量	212.8 kcal / mol -CH ₄
反応開始温度	~ 500 °C (触媒使用時)
触媒 担体	アルミナ等多孔性セラミックペレット又はペブル (形状は任意製作可能だが R & D等必要)
触媒	Pt 等貴金属
反 応 次 数	1 次反応 (メタンに対し 1 次)
反応の活性化 エネルギー	21 kcal / mol (500 °C と 600 °C で 14 倍の反応速度比)

Table 4.1.4 Effective thermal conductivity of packed column

CASE	*1) FLUID	SOLID	T (°C)	ϵ	e_m	D_p (mm)	U_o (cm/s)	λ_e (W/mK)	*2) λ_w (W/mK)
1	He	Li ₂ O	400	0.3	0.3	3	2	1.98	1.14
2	He	Li ₂ O	600	0.3	0.3	3	2	1.93	1.30
3	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	1	2	1.77	1.33
4	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	3	0	1.90	1.45
5	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	3	1	1.90	1.45
6	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	3	2	1.90	1.45
7	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	3	5	1.90	1.45
8	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	3	10	1.91	1.46
9	He	Li ₂ O	800	0.3	0.3	5	2	2.03	1.57
10	He	Li ₂ O	800	0.3	0	3	2	1.71	1.27
11	He	Li ₂ O	800	0.4	0.3	3	2	1.45	1.45
12	He	Li ₂ O	1000	0.3	0.3	3	2	1.90	1.61
13	He	Be	800	0.3	0.5	3	2	6.13	2.86

T : Temperature

ϵ : Void Fraction

e_m : Emissivity of Pebble

D_p : Pebble Diameter

U_o : Superficial Velocity

λ_e : Effective Thermal Conductivity (bulk)

λ_w : Effective Thermal Conductivity (near wall)

*1) Fluid Pressure is 0.1 MPa in every Case.

*2) Within the Distance of D_p from wall, Void Fraction is 0.7 in every Case.

Table 4.1.5 Effective thermal conductivity increment due to gas flow with various pebble diameters, packing fractions and superficial velocities

T (°C)	D _p (mm)	f _p (%)	λ _{eo} (w/mK)	λ _e ⁺ - 1 (%)				
				U ₀ (m/s)				
				0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
800	1	70	1.77	0.132	0.659	1.32	6.59	13.2
		60	1.30	0.179	0.897	1.79	8.97	17.9
	3	70	1.90	0.368	1.84	3.68	18.4	36.8
		60	1.45	0.483	2.41	4.83	24.1	48.3
	5	70	2.04	0.572	2.86	5.72	28.6	57.2
		60	1.60	0.729	3.65	7.29	36.5	72.9

T : Temperature

D_p : Pebble Diameter

f_p : Packing Fraction

λ_{eo} : Effective Thermal Conductivity
without Gas Flow

λ_e⁺-1 : Effective Thermal Conductivity
Increment due to Gas Flow

U₀ : Superficial Velocity

Table 4.2.1 Analytical parameters

	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
Scale factor*	1/1	1/2	1/4
TF coil current	$I_1 = 8.492 \times 10^6$ (AT)	$I_2 = 2.123 \times 10^6$ (AT) $= I_1/4$	$I_3 = 5.3075 \times 10^5$ (AT) $= I_1/16$
Plasma current	$I_{p1} = 8.74 \times 10^6$ (A)	$I_{p2} = 2.185 \times 10^6$ (A) $= I_{p1}/4$	$I_{p3} = 5.4625 \times 10^5$ (A) $= I_{p1}/16$
Reduction rate of plasma current	8.74×10^7 (A/sec)	8.74×10^7 (A/sec)	8.74×10^7 (A/sec)

* Geometrical ratio to test module in FER (1986)

Table 4.2.2 Deflection and bending stress of rectangular plates

○ 最大応力発生点 × 最大たわみ発生点
 // 固定辺 — 回転辺 - - - 自由辺
 E: 縦弾性係数
 h: 板厚

No.	荷重状態および支持条件	最大たわみ w_{max} 最大曲げ応力 σ_{max}
1	等分布荷重, 4辺支持 	$w_{max} = \alpha_1 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $\sigma_{max} = \beta_1 \frac{pa^2}{h^2}$
2	等分布荷重, 4辺固定 	$w_{max} = \alpha_2 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $\sigma_{max} = \beta_2 \frac{pa^2}{h^2}$
3	等分布荷重 相対する2辺固定 相対する2辺支持 	b > a, a > b に応じて $w_{max} = \alpha_3 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $w_{max} = \alpha_3' \frac{pb^4}{Eh^3}$ $\sigma_{max} = \beta_3 \frac{pa^2}{h^2}$ $\sigma_{max} = \beta_3' \frac{pb^2}{h^2}$
4	等分布荷重 1辺固定, 3辺支持 	b > a, a > b に応じて $w_{max} = \alpha_4 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $w_{max} = \alpha_4' \frac{pb^4}{Eh^3}$ $\sigma_{max} = \beta_4 \frac{pa^2}{h^2}$ $\sigma_{max} = \beta_4' \frac{pb^2}{h^2}$
5	等分布荷重 3辺支持, 1辺自由 	$w_{max} = \alpha_5' \frac{pb^4}{Eh^3}$ $\sigma_{max} = \beta_5' \frac{pb^2}{h^2}$

(α , β は両辺長の比によって決まる係数)

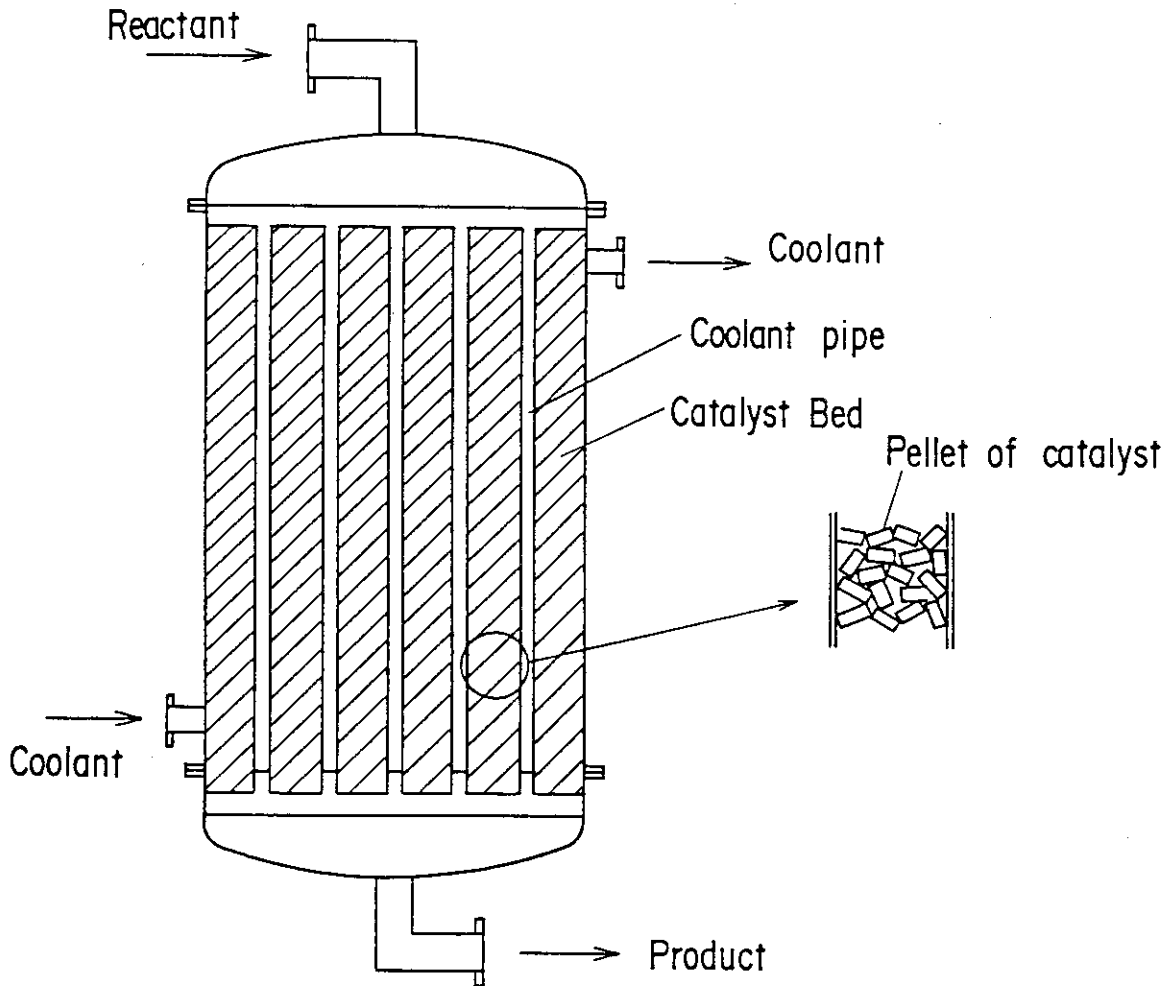


Fig. 4.1.1 Fixed bed of catalyst

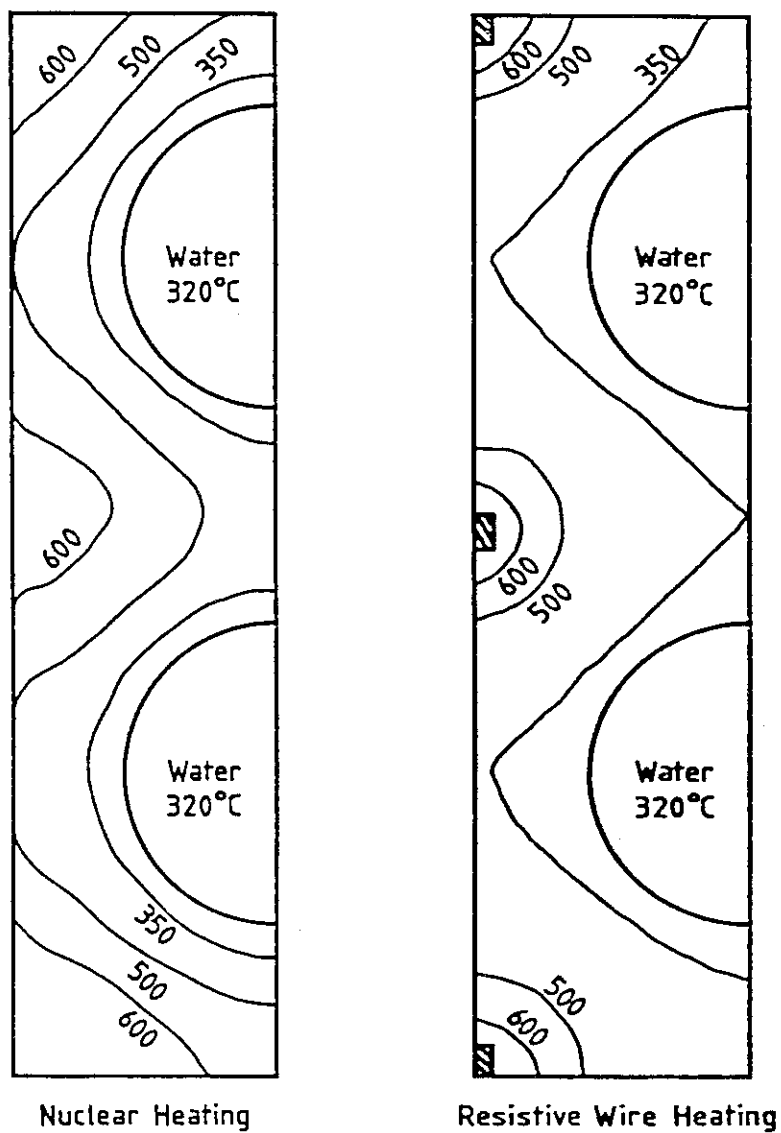
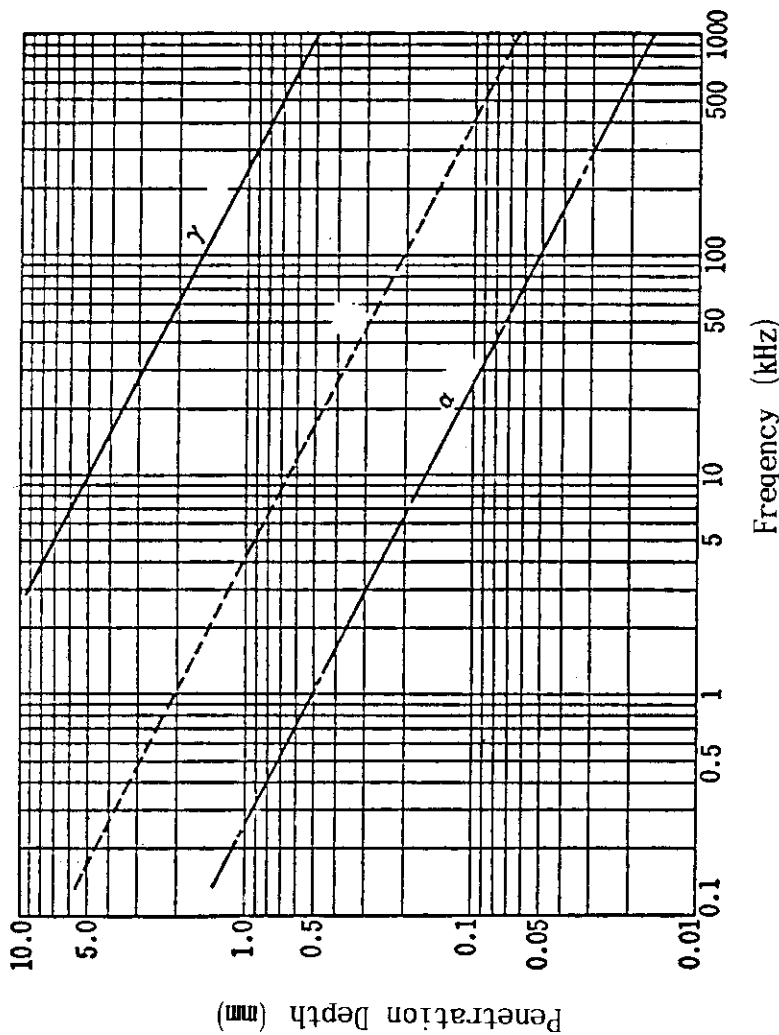


Fig. 4.1.2 Temperature profiles for section LiAlO_2/Be BOT geometry²⁾ near the first wall, under fusion reactor and discrete-wire heating (An example)



Frequency vs. Penetration Depth
for γ Iron at High Temperature

Frequency	Penetration Depth
400 kHz	0.8 mm
200 kHz	1.1 mm
100 kHz	1.6 mm
20 kHz	3.4 mm
10 kHz	5.0 mm
3 kHz	8.5 mm

Fig. 4.1.3 Relation between frequency and penetration depth
in high-frequency joule heating³⁾

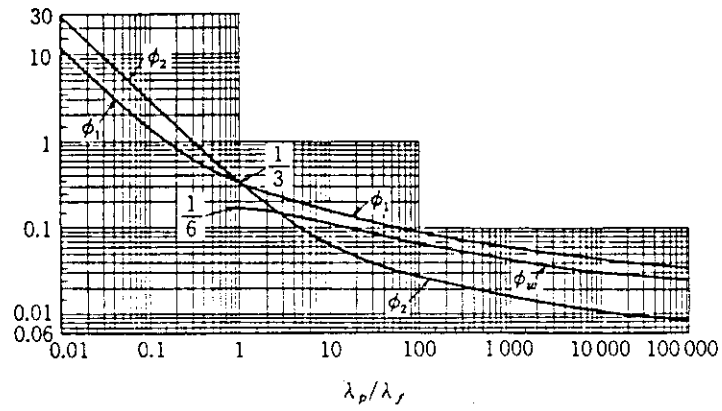


Fig. 4.1.4 Values of ϕ_1 , ϕ_2 , and ϕ_w ⁴⁾

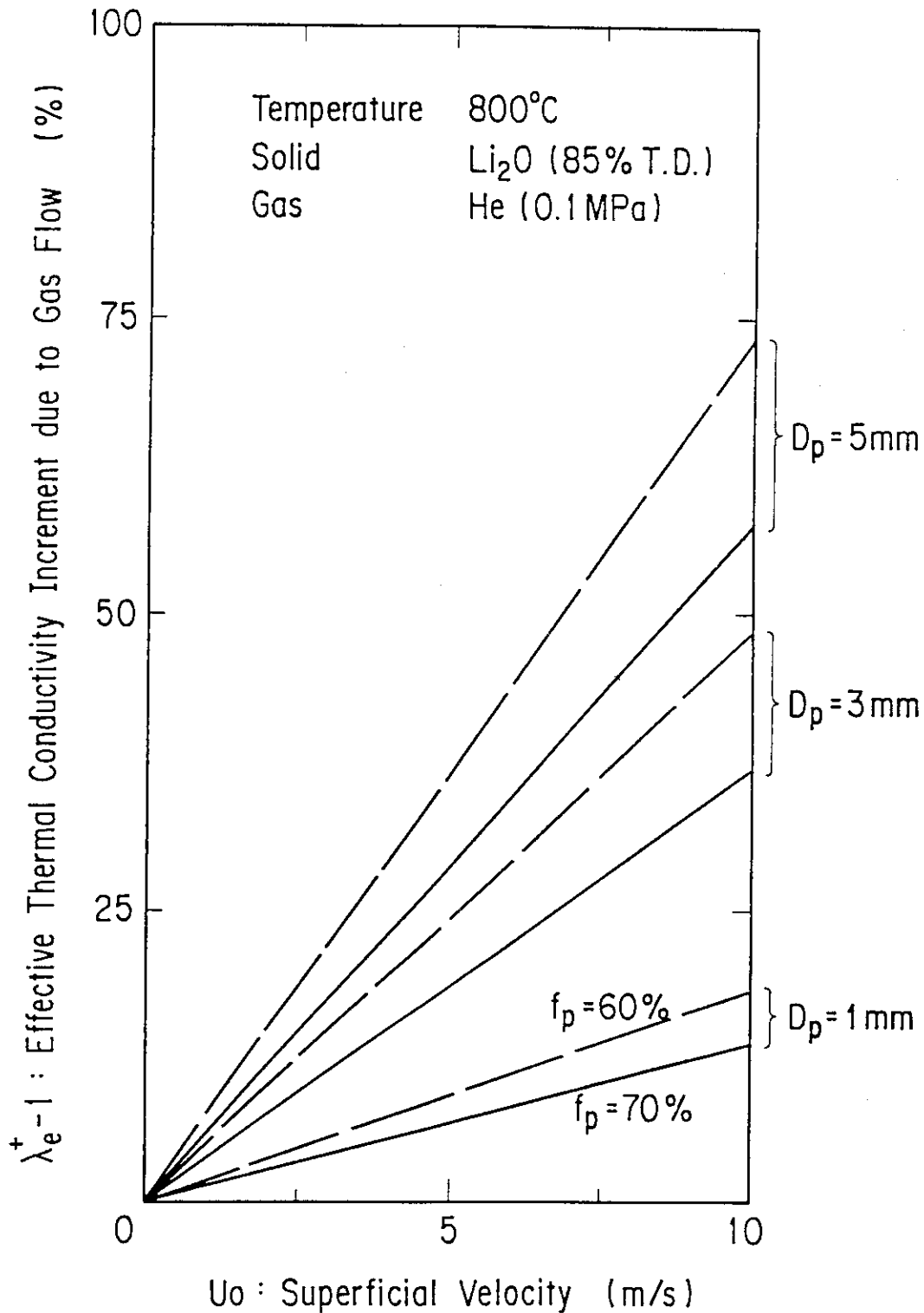


Fig. 4.1.5 Effective thermal conductivity increment due to gas flow as a function of superficial velocity with various pebble diameters and packing fractions

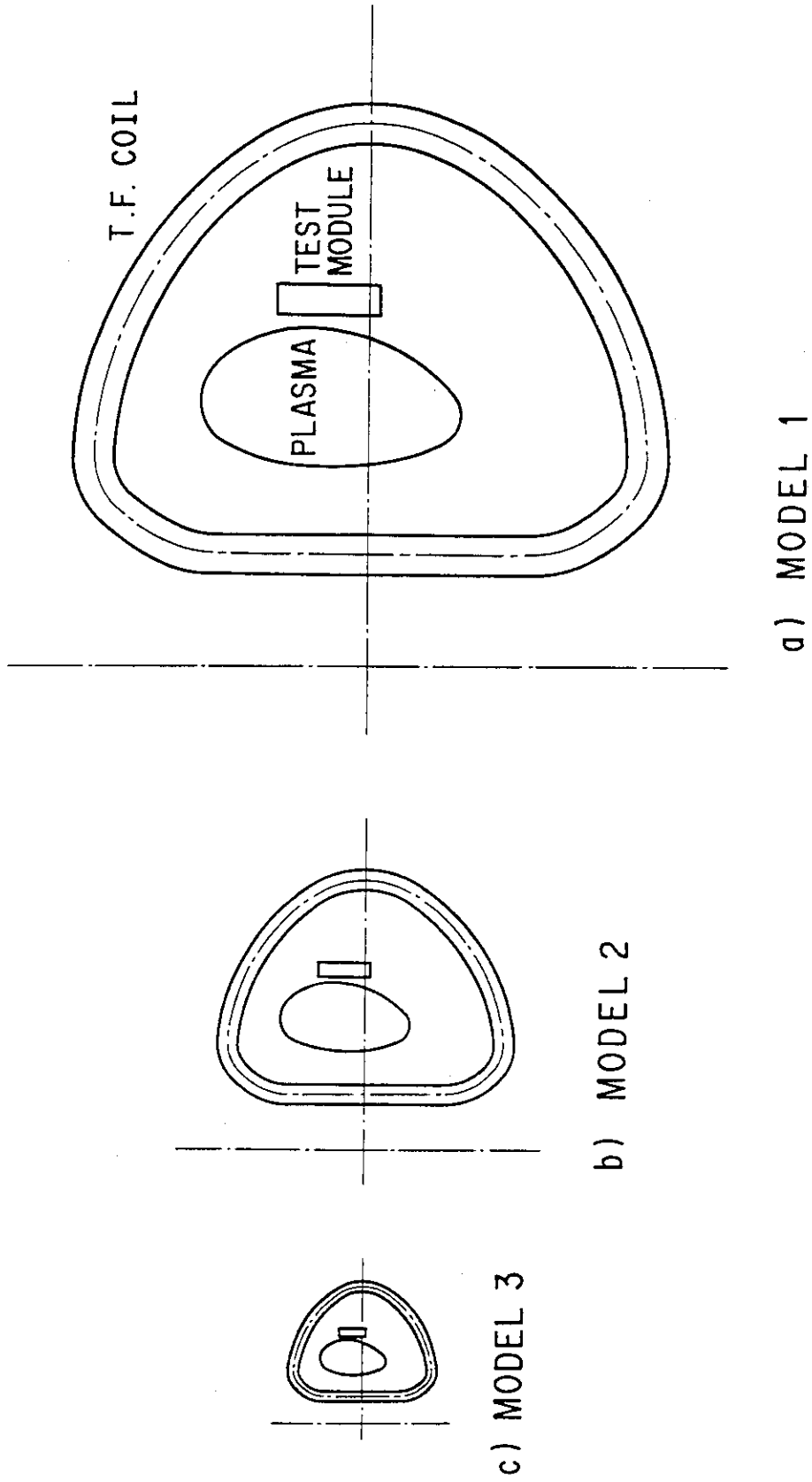


Fig. 4.2.2 Scaling concepts

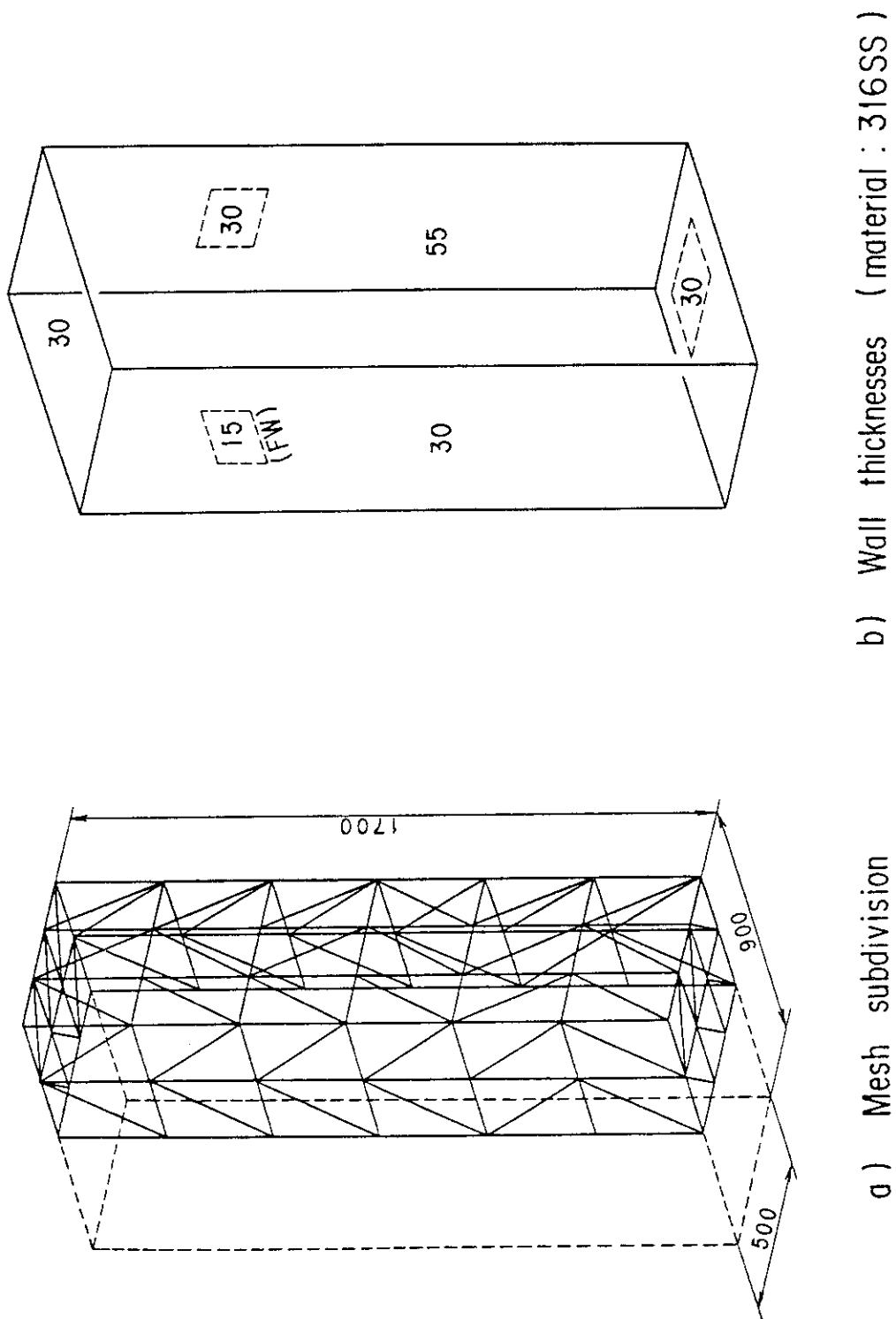


Fig. 4.2.3 Analytical model (MODEL 1)

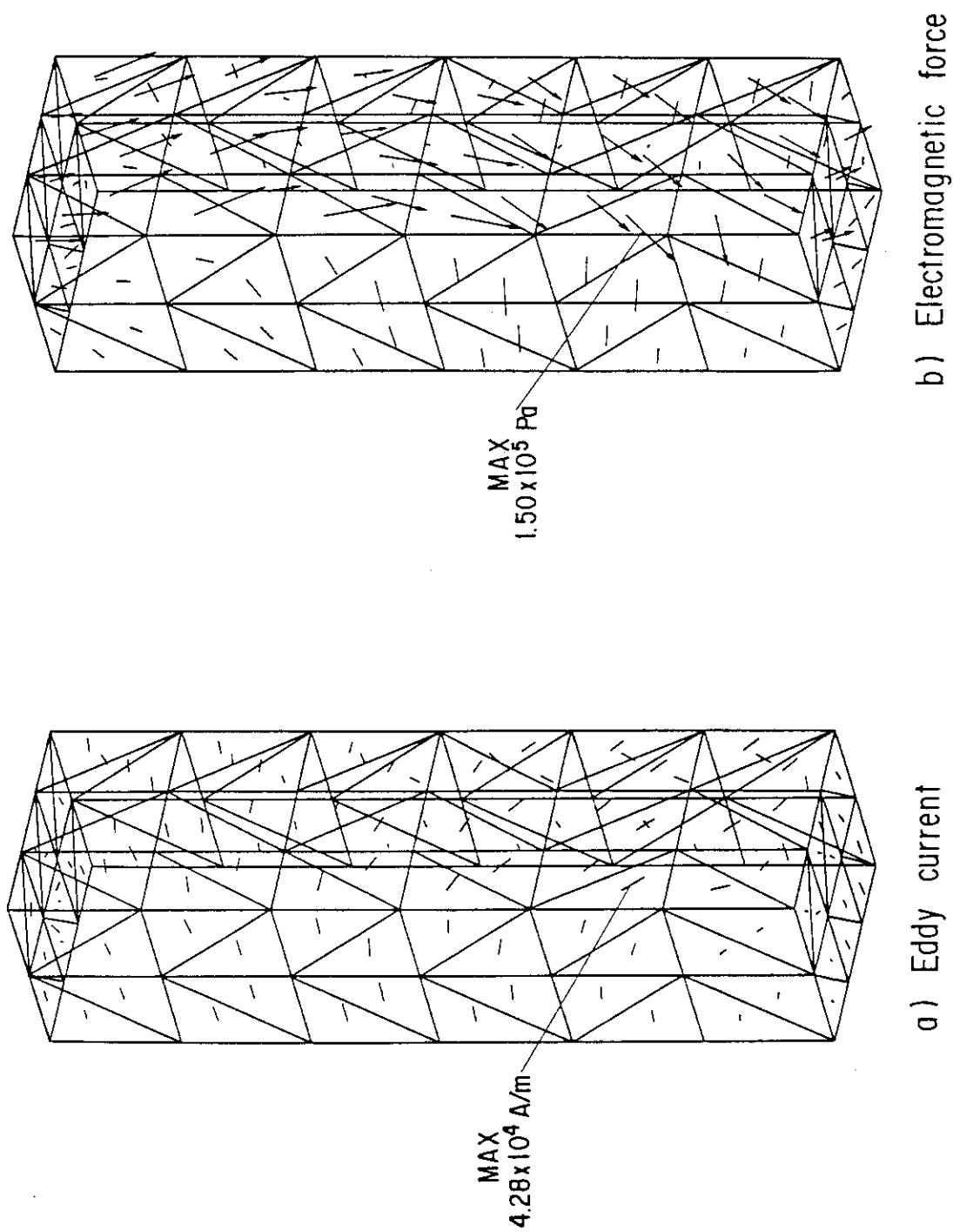


Fig. 4.2.4 Analytical results (MODEL 1 at 50 msec)

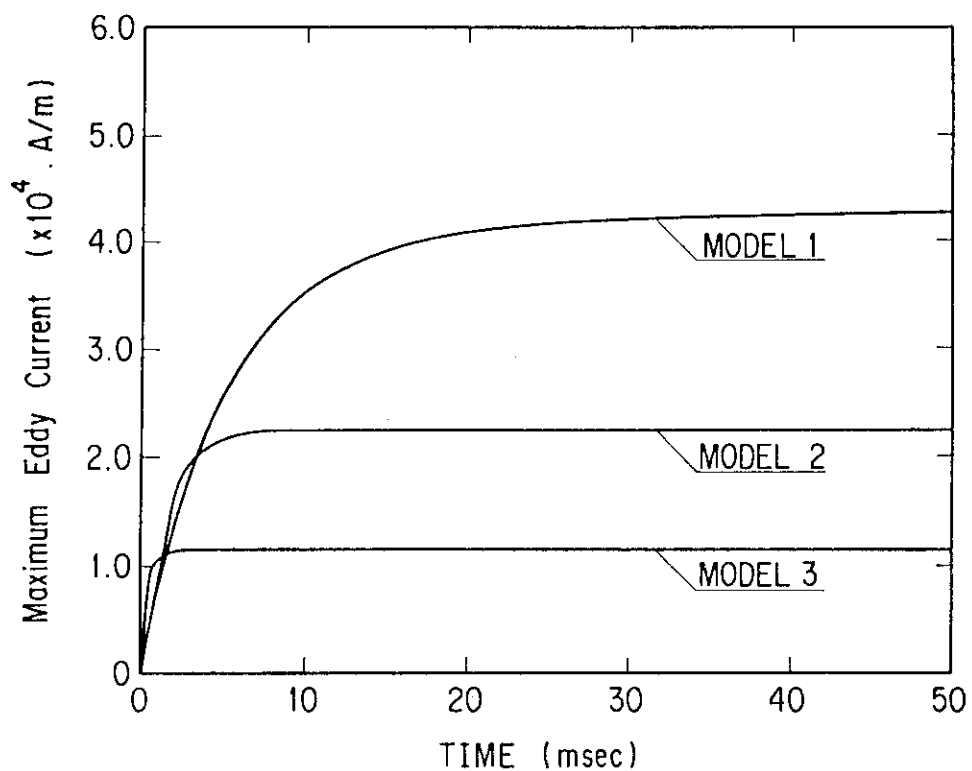


Fig. 4.2.5 Responses of maximum eddy currents

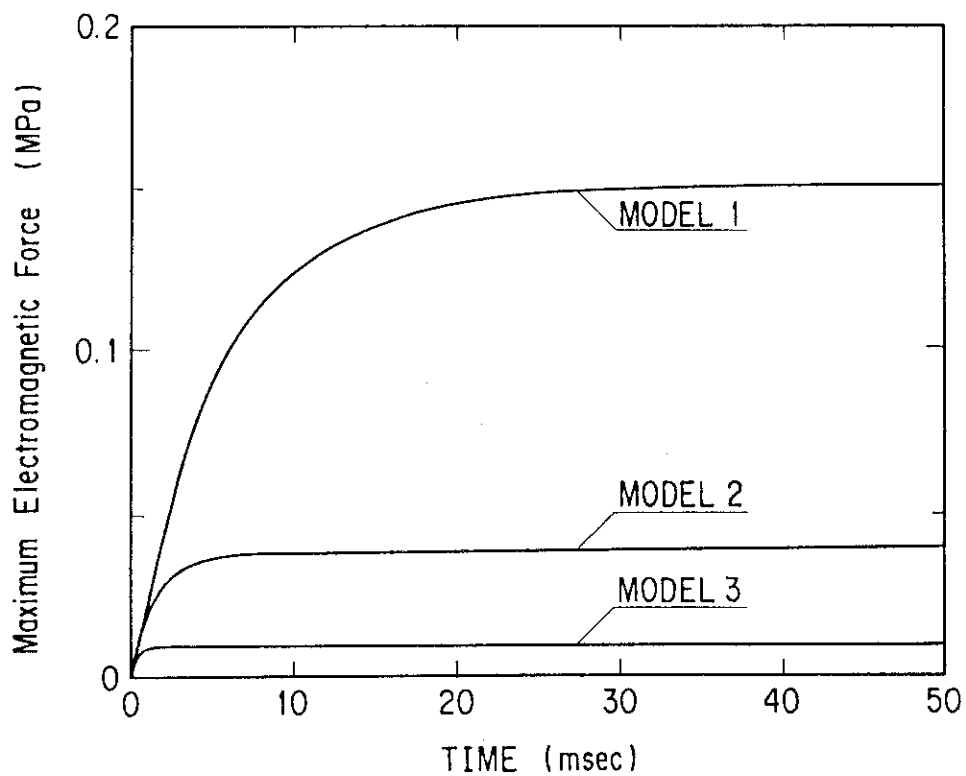


Fig. 4.2.6 Responses of maximum electromagnetic force

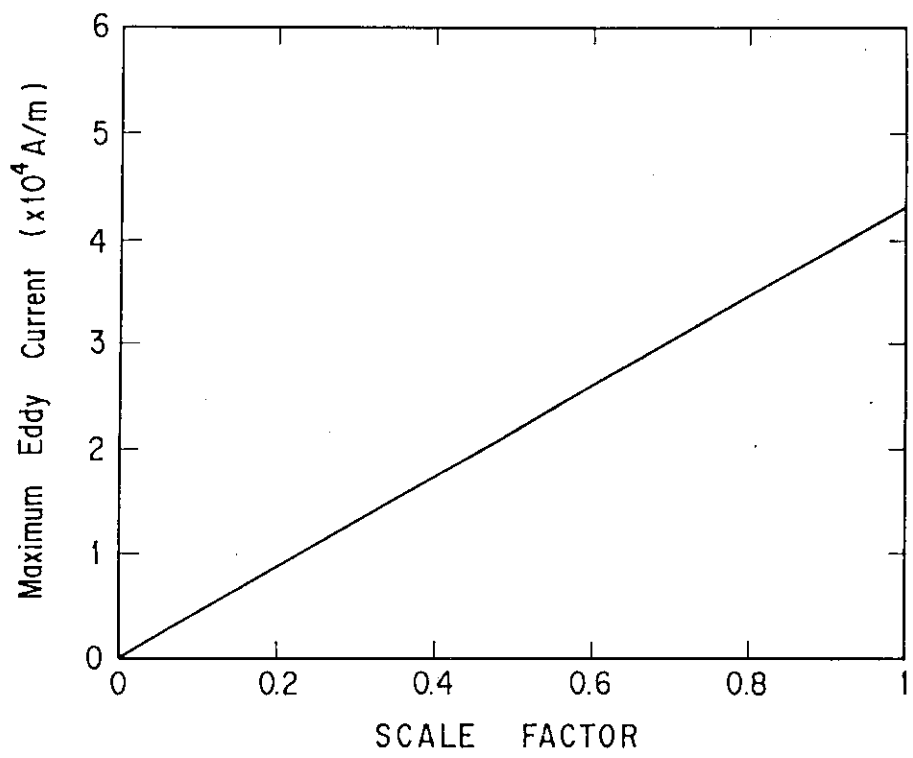


Fig. 4.2.7 Maximum eddy current as a function of scale factor

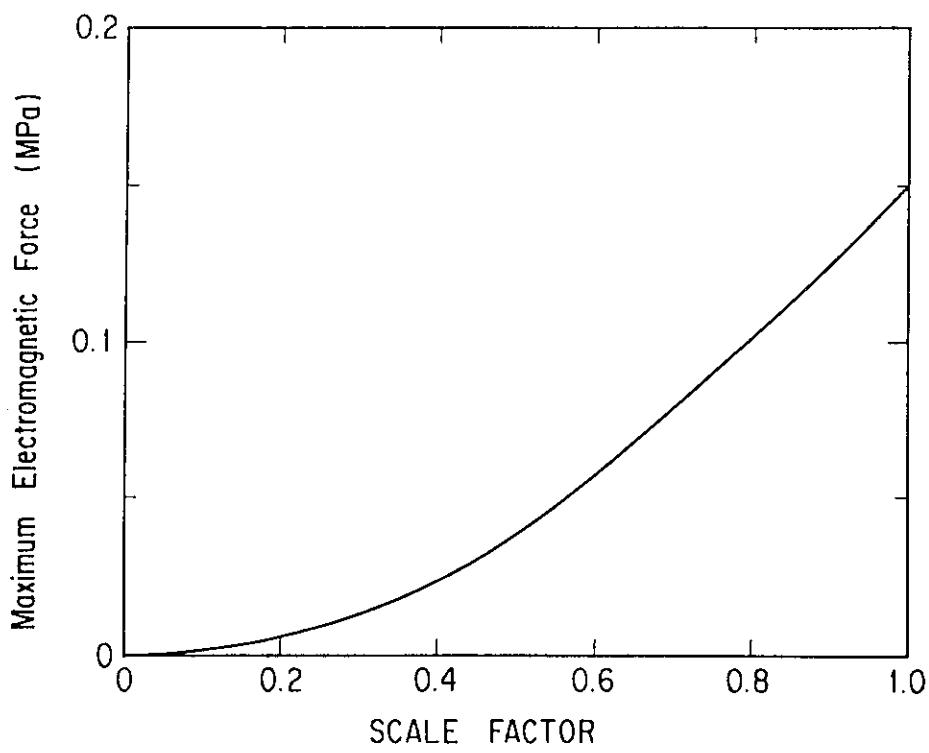


Fig. 4.2.8 Maximum electromagnetic force as a function of scale factor

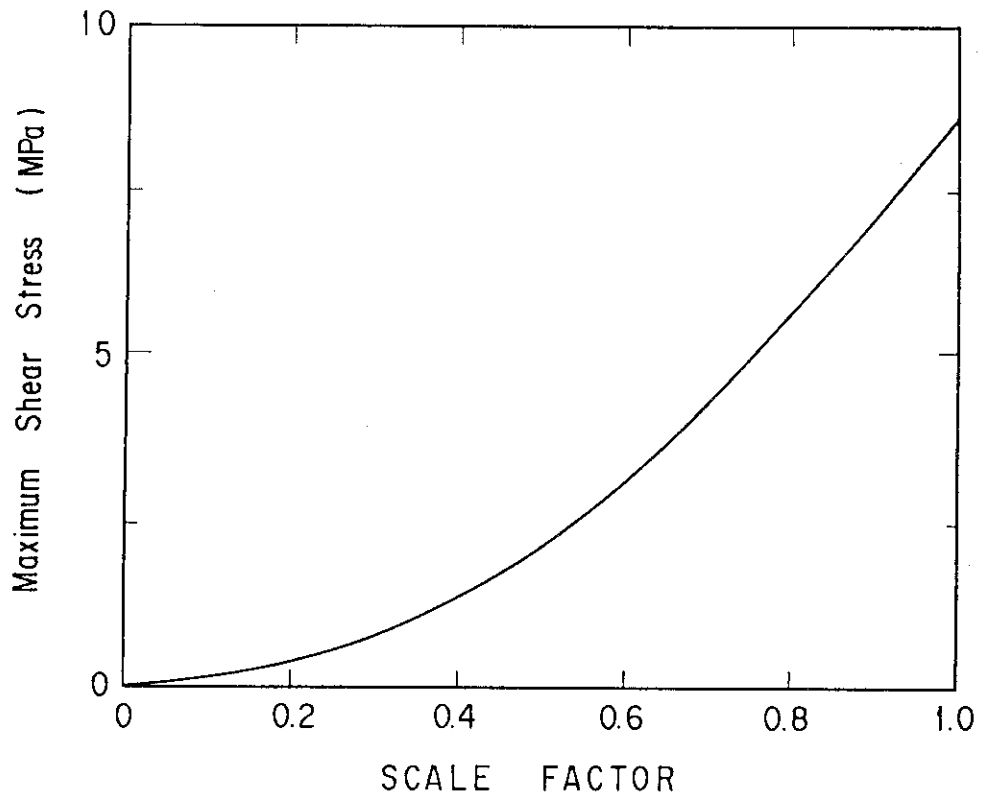
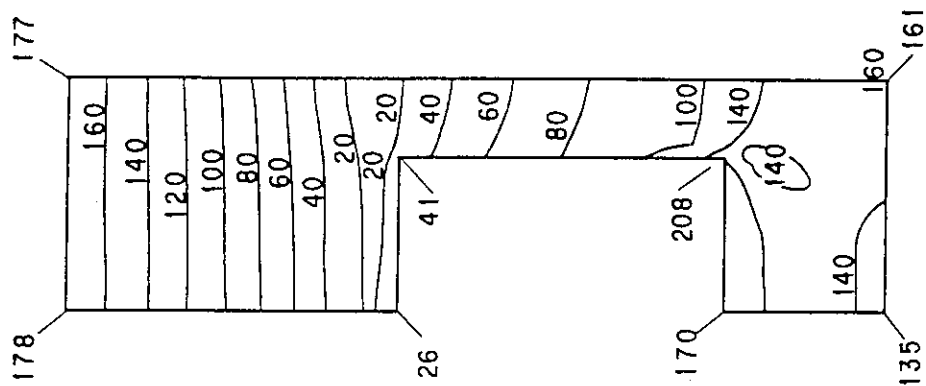
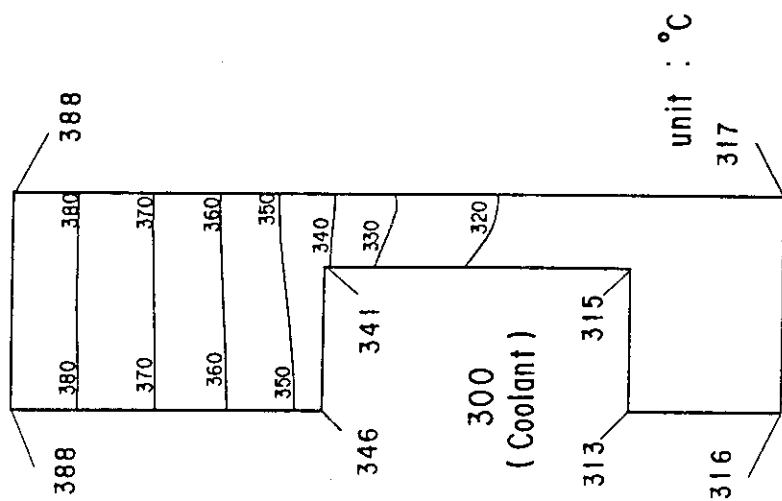


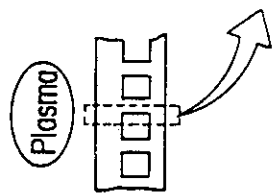
Fig. 4.2.9 Maximum shear stress as a function of scale factor



b) Thermal stress profile



a) Temperature profile



Surface heat flux : 0.133 MW/m^2
 Volumetric heating rate : 15 MW/m^3
 Structural material : PCA
 Coolant : He
 (100/300 °C, 4MPa)

Fig. 4.2.10 Thermal stress in the first wall of breeding blanket

5. 結 言

本設計は、核融合エネルギーの実用化を目指したブランケット総合開発計画に反映することを目的として、増殖ブランケットの開発に必要な開発手順と試験項目並びに試験設備について検討を加え、各種試験設備について概念設計を行ったものである。

炉外コールド試験のうちの高熱負荷試験、伝熱流動試験、構造健全性試験、増殖材料およびブランケット構造体の製造技術開発試験のための試験設備の基本的な仕様と設備概要を明らかにした。これらの設備によりブランケットの設計、製作、運転のための工学データの取得が可能となり、また様々な構造概念や材料の評価、選択に資することが出来る。

ブランケット技術の開発にはここで述べた4設備以外にもさらに次のような試験のための設備が必要と考えられる。

① 炉外コールド試験

安全性試験

信頼性試験

ベリリウム(Be)の取扱い技術

遠隔操作技術開発

② ホット試験

14 MeV中性子によるニュートロニクス試験

トリチウム生成・回収特性試験(核分裂炉)

今回の検討で検討しなかったこれらの試験設備に関しては、今後、順次検討して行く予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの有益なコメントを頂きました元炉設計研究室東稔達三主任研究員(現、企画室調査役)とトリチウム技術研究室吉田浩主任研究員に深く感謝いたします。

5. 結 言

本設計は、核融合エネルギーの実用化を目指したブランケット総合開発計画に反映することを目的として、増殖ブランケットの開発に必要な開発手順と試験項目並びに試験設備について検討を加え、各種試験設備について概念設計を行ったものである。

炉外コールド試験のうちの高熱負荷試験、伝熱流動試験、構造健全性試験、増殖材料およびブランケット構造体の製造技術開発試験のための試験設備の基本的な仕様と設備概要を明らかにした。これらの設備によりブランケットの設計、製作、運転のための工学データの取得が可能となり、また様々な構造概念や材料の評価、選択に資することが出来る。

ブランケット技術の開発にはここで述べた4設備以外にもさらに次のような試験のための設備が必要と考えられる。

① 炉外コールド試験

安全性試験

信頼性試験

ベリリウム (Be) の取扱い技術

遠隔操作技術開発

② ホット試験

14 MeV中性子によるニュートロニクス試験

トリチウム生成・回収特性試験 (核分裂炉)

今回の検討で検討しなかったこれらの試験設備に関しては、今後、順次検討して行く予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの有益なコメントを頂きました元炉設計研究室東稔達三主任研究員 (現、企画室調査役) とトリチウム技術研究室吉田浩主任研究員に深く感謝いたします。