

JAERI-Research

2000-036



JP0050832



核融合実験炉における ECH ランチャー
の中性子遮蔽概念設計

2000 年 9 月

高橋 幸司・今井 剛・毛利 憲介*・森 清治*・野本 恭信*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

核融合実験炉における ECH ランチャーの中性子遮蔽概念設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

高橋 幸司・今井 剛

毛利 憲介*・森 清治*・野本 恭信*

(2000年7月24日 受理)

核融合実験炉における電子サイクロトロン波加熱/電流駆動(ECH/ECCD)ランチャーの概念設計について述べる。1ポートあたり20~25 MWのEC波が入射可能で、超伝導コイルや真空窓(ECH トーラス窓)を中性子などの放射線による損傷から保護する遮蔽性能を有することが必要である。それらの条件を満たすようなECHランチャー用ブランケットや導波管束、遮蔽体の概念設計検討を行うと共に、その概念設計検討を基に2次元の遮蔽解析を行い、詳細設計のための設計指針を得た。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

* 川崎重工業株式会社

Conceptual Design of Neutron Shield for ECH Launcher
on D-T Fusion Reactors

Koji Takahashi, Tsuyoshi IMAI,
Kensuke MOHRI*, Seiji MORI* and Yasunobu NOMOTO*

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 24, 2000)

Conceptual design of Electron Cyclotron Heating and Current Drive (ECH/ECCD) launcher for fusion reactors is described. The ECH injection power of 20~25 MW per a port and the shielding capability to protect superconducting magnets and ECH torus windows from radiation damages are required for the ECH launcher in deuterium – tritium (D-T) fusion reactors. The conceptual design study and the nuclear analysis (2D) for the ECH launcher to qualify the design specification were carried out. The guideline of the detail design for the ECH launcher was obtained.

Keywords : ECH/ECCD, Launcher, Torus Window, Shields,
D-T Fusion Reactors

* Kawasaki Heavy Industries, LTD.

目 次

1. 序論	1
2. ECH ランチャー用遮蔽ブランケット概念設計	2
2.1 設計条件	2
2.2 遮蔽ブランケットモジュール設計検討	2
2.3 遮蔽ブランケットの電磁力による応力検討	5
2.4 遮蔽ブランケットモジュール製作性及び保守性検討	7
3. ECH ランチャープラグ概念設計	8
3.1 設計条件	8
3.2 ECH ランチャープラグ概念設計検討	9
3.2.1 先端ミラー	9
3.2.2 導波管束配置設計	10
3.2.3 プラグ遮蔽体概念設計	10
3.3 ECH ランチャープラグ製作性及び保守性検討	11
4. ECH ランチャー 2次元遮蔽解析	11
4.1 計算方法及び解析条件	11
4.2 計算結果	11
5. まとめ	14
謝辞	15
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Design of Shield Blanket for ECH Launcher	2
2.1 Design Conditions	2
2.2 Design of Shield Blanket Module	2
2.3 Investigation of Stress on ECH Blanket Module	5
2.4 Manufacturing and Maintenance of Shield Blanket Module	7
3. Conceptual Design of Plug for ECH Launcher	8
3.1 Design Conditions	8
3.2 Conceptual Design of ECH Launcher Plug	9
3.2.1 Injection Mirror	9
3.2.2 Design of Waveguides Layout	10
3.2.3 Conceptual Design of Plug Shield Block	10
3.3 Manufacturing and Maintenance of ECH Launcher Plug	11
4. 2D Nuclear Analysis of ECH Launcher	11
4.1 Calculation Condition and Method	11
4.2 Calculation Result	11
5. Conclusion	14
Acknowledgment	15
References	16

1. 序論

電子サイクロトロン波(ECH)加熱装置は、プラズマ加熱・電流駆動、分布制御、プラズマ初期立ち上げなどのツールとして、国際熱核融合実験炉 (ITER) 等の核融合実験炉で必要とされている。ITER 級の核融合プラズマを考えた場合、外部からの追加熱入力としての ECH パワーは 1 ポートあたり 20~25 MW 必要とされる[1]。また、核融合燃料としてトリチウムを使用する核融合実験炉においては、核融合反応で生ずる 14 MeV の高エネルギー中性子等の放射線により ECH 入射系(ランチャー)で真空隔壁として使用するダイヤモンド窓やプラズマを閉じ込めるために使用する超伝導コイル等の性能が劣化することが考えられ、それらを保護する遮蔽構造が必要である。

ECH ランチャーの構造概念を図 1 に示す[1]。高周波入射用スロットを有する先端の遮蔽ブランケット、入射角度可変用ミラー、ミラー駆動装置、導波管、マイターバンド、真空窓、遮蔽体、冷却水配管などを格納するランチャープラグからなる。今回、低コスト ITER(ITER-FEAT)[1]の基本仕様を参考に核融合実験炉用 ECH ランチャーの概念設計検討を行った。目的は、1 ポートあたりの限られたスペースから 20~25 MW の ECH パワーが入射可能で、真空窓や超伝導コイルを放射線から所定の遮蔽性能で保護する遮蔽構造を有する ECH ランチャー設計の可能性を検討することであり、今後の詳細設計に反映させるための指針を得ることである。

第 2 章では ITER の遮蔽ブランケット一般モジュールの概念[2]を応用した ECH ランチャー用遮蔽ブランケットの概念設計について述べる。第 3 章では、ECH 入射用ミラーの熱負荷や冷却水流量の検討、導波管の配置、遮蔽構造の検討を中心に ECH ランチャープラグ部の概念設計について述べる。第 4 章では、2, 3 章で述べる概念設計検討を基に 2 次元の遮蔽解析用モデルを作成し、遮蔽条件を満たす ECH ランチャー設計指針を得るために行った 2 次元遮蔽解析とその結果について議論する。

2. ECH ランチャー用遮蔽ブランケット概念設計

ECH ランチャー用遮蔽ブランケットは、一般遮蔽ブランケットと同様の中性子やプラズマからの熱流束に曝される。従って、中性子壁負荷 1.29 MW/m^2 、表面熱負荷 0.5 MW/m^2 に耐え得るとして設計された ITER 用一般遮蔽ブランケット(特に第 1 壁)の概念[2]を応用した。ECH ランチャー用として、大電力高周波(RF)を入射するためのスロットを設ける必要がある。

2.1 設計条件

ECH ランチャー用遮蔽ブランケットの基本設計条件を表 2.1 に示す。中性子壁負荷について、例えば ITER-FEAT での最大値 0.78 MW/m^2 に対して若干余裕を見て 1 MW/m^2 とした。この条件を基に、冷却や製作性、保守性などを考慮して概念設計検討を行った。

表 2.1 基本設計条件

構造材	SUS316LN(IG)
構造材使用温度	< 500 °C
冷却材	軽水
冷却材入口/出口温度	100 / 150 °C
冷却材圧力(MPa)	4
第一壁ヒートシンク材	DSCuAl25(IG)
第一壁アーマー材	Be
第一壁表面熱負荷(Ave., MW/m^2)	0.25
中性子壁負荷(MW/m^2)	1
ECHランチャー設置位置	水平ポート内
ECHポート寸法	$1800 \times 2200 \text{ m}^2$

2.2 遮蔽ブランケットモジュール設計検討

ECH ランチャー用遮蔽ブランケットには、RF 入射のためのスロットを設ける必要があるが、RF を縦長の 1 スロットから入射するとし概念設計を行った。ブランケットの製作性や固定方法などを考慮すると、ECH ポートを覆う遮蔽ブランケットを一体で成立させるのは困難であり、幾つかのモジュールに分割しそれを組み合わせる構造とした。代表例の構造概念を図 2.1 に示す。3 種類

のモジュールに分割し(計 8 個), それぞれを ECH ポート用のバックプレート(ブランケット支持盤)に固定する. プラズマは曲率を有しているが, 各モジュールは出来る限り簡易な構造とするために曲面を持たない平面構造とする. 例として, 図 2.1 にあるモジュール A の詳細構造を図 2.2, 2.3 に示す. 第 1 壁の構成は図 2.4 に示すように, 1)アーマ材としては Be を, 2)ヒートシンク材としてはアルミナ分散強化銅(DSCu)を, 構造部材としてステンレス(SUS316LN-IG)を使用する. 先述のように, 一般遮蔽ブランケットにおける第 1 壁の概念[2]を適用しているが, モジュールのスロット側の側面は前面と同程度の中性子やプラズマからの熱流束に曝されることから, その側面にも第 1 壁構造が必要となる.

遮蔽ブランケットの固定方法は, バックプレートに固定用のはめ込み穴を設け, そこへモジュール後方に設けた支持キー(図 2.2, 2.3)をはめ込んだ後にバックプレート後方よりスミ肉溶接により固定する 1 点支持構造を採用した(図 2.3). この方法は 2 点支持よりも支持キーにかかる電磁力や熱曲げによる多大な応力を大幅に軽減できる. モジュール A の支持キー(150×200 mm²)の許容せん断応力 τ を 67.8 MPa と想定したときの許容トルク, T を下式[3]により,

$$T = K1 \cdot a \cdot b^2 \cdot \tau \quad (2-1)$$

0.068 MNm と見積もることが出来る. ここで a , b , $K1$ はそれぞれ $a=200$ mm, $b=150$ mm, ab の値により求められる係数(0.224)である. 許容せん断応力は通産省告示第 501 号[4]に準拠する構造設計基準を想定し, SS316L の使用温度 150 °C として求めたものである. この数値(0.068 MNm)は今後の電磁力や熱応力の解析を行う上での指標となる. モジュール A 支持キーの電磁力に対する応力について簡易的に検討した結果を次節で述べる.

モジュール A について, 必要な冷却水流量及び圧力損失を検討した. 表 2.2 に各部での冷却水配管のサイズや数量及び流量を示す. 核融合出力を 650 MW, その出力を炉内のブランケット面で平均的に受けると仮定したとき, ECH ランチャー用遮蔽ブランケットの除熱量 Q を典型的な一般遮蔽ブランケットとモジュール A との面積比と熱負荷比(アウトボード効果)を考慮して次式,

$$Q = (\text{核融合出力}) + (\text{一般モジュール数}) \times (\text{面積比}) \times (\text{熱負荷比}) \quad (2-2)$$

で評価するとおよそ 0.48 MW となる。但し、面積比、熱負荷比はそれぞれ 0.25, 1.2 とした。第 1 壁での冷却水の流速を 3 m/sec と仮定すると、冷却水温度上昇分、 ΔT は次式

$$\Delta T = Q / (C_p \cdot V \cdot A \cdot \rho) \quad (2-3)$$

で評価でき 18.4 °C となる。ここで、 C_p , V , A , ρ はそれぞれ比熱 (4291 J/kg/K at 4 MPa, 150 °C), 流速, 第 1 壁冷却流路断面積 ($0.005 \times 0.005 \times \pi \text{ m}^2 \times 28$), 密度 (921.7 kg/m³ at 4 MPa, 150 °C) である。ランチャー用遮蔽ブランケットの流路は、冷却母管からポート中心に対して左右のブランケットモジュール群に供給する 2 シリーズフローを想定している。従って、片側において設計条件 $\Delta T < 50$ °C を満たす必要があるが、モジュール A が存在する方を考えた場合、

表 2.2 モジュール A 冷却水流量

Item		Water channel size (mm)	Number	Max. Flow Velocity (m/s)
Inlet	Inlet pipe	φ69.3	1	1.75
FW	FW inlet header	80 x 40	1	2.06
	FW	φ10	28	3
	FW outlet header	75 x 35	1	2.51
Shield	L Inlet header	30 x 120	1	1.83
	Shield (L-1)	φ24	14	1.04
	L lower header	30 x 120	1	1.83
	Shield (L-2)	φ24	14	1.04
	L upper header	30 x 120	1	1.83
	Shield (L-3)	φ24	17	0.86
	L outlet/Rinlet header	30 x 120	1	1.83
	Shield (R-1)	φ40	4	1.31
	R upper header	30 x 90	1	2.09
	Shield (R-2)	φ40	4	1.31
	R lower header	30 x 90	1	2.09
	Shield (R-3)	φ40	5	1.05
	R outlet header	30 x 90	1	2.09
Outlet	Outlet pipe	φ69.3	1	1.75

* Those values are based on the FW flow velocity, 3 m/sec.

式(2.2), (2.3)を用いて除熱量, 温度上昇分を見積もるとそれぞれ, 1.24 MW, 47.5 °C となり温度条件を満たす. モジュール A の冷却流路の検討図を図 2.5 に, バックプレートとブランケットモジュールをの冷却配管の取り合いの概略構造を図 2.6, 2.7 に示す. この様な経路での圧力損失は, 直管の場合のワイズバッハーダルシ(Weisbach-Darcy)の式

$$h_1 = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2g} \quad (2.4)$$

や屈曲部の圧力損失の評価式

$$h_2 = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.5)$$

等から各配管のサイズなどを考慮して求めることができる. 但し, λ : 管摩擦係数, l : 流路長, d : 配管内径, ρ : 流体の体積密度, g : 重力加速度, K : 損失係数(屈曲角度や半径などにより決まる)である. 式(2.4), (2.5)等を用いてモジュール A に対して計算するとおおよそ $0.3 \text{ kg/cm}^2 (0.03 \text{ MPa})$ となる.

2.3 遮蔽ブランケットの電磁力による応力検討

プラズマ消滅(ディスラプション)時には, 遮蔽ブランケットに電磁力が加わるために, その電磁力を考慮した強度設計を行う必要がある. ここでは, ITER-FDR 時の電磁力解析結果[2]を使用し, 径方向に作用する力及びモーメントは第 1 壁に相当する部分の面積比を換算係数($600 \times 675 \text{ mm}^2 / 1095 \times 1415 \text{ mm}^2 = 0.261$)とし, 上下方向に作用するモーメントをモジュールの上下面の面積比から換算係数($395 \times 675 \text{ mm}^2 / 1095 \times 1415 \text{ mm}^2 = 0.172$)としてブランケットモジュール A に作用する電磁力を仮定し, それにより引き起こされる引っ張り力やモーメントなどの見積もりを行った. それを表 2.3 に示す. 電磁力は電流 21 MA のプラズマがセンタディスラプションにより 50 msec で消滅するというシナリオに基づいた計算結果[2]を使用した. これらの数値からモジュール

ル A の支持キー及びスミ肉溶接の引っ張り・圧縮応力、曲げ応力、ねじり応力をそれぞれ評価した。評価方法は、機械工学便覧の材料力学評価における解析式を適用した[3]。その際、通産省告示第 501 号[4]に準拠する構造設計基準を想定し、支持キーの引っ張り・圧縮、曲げの許容応力を 116 MPa、許容せん断応力を 67.8 MPa、溶接部の片側全厚スミ肉溶接の溶接効率を 0.5 と仮定したときの溶接部の許容応力 33.8 MPa とした。材料は SS316 としている。

表 2.3 モジュール A に加わる電磁力

	一般モジュール	モジュールA
引っ張り・圧縮(FN)	1 MN	0.26 MN
ポロイダル方向のモーメント(Mp)	0.73 MNm	0.19 MNm
径方向モーメント(Mr)	0.45 MNm	0.08 MNm

<支持キー>

- 1) 引っ張り・圧縮応力に関する応力

$$\sigma_{\text{軸}} = FN / (A \times B) = 8.7 \text{ MPa}$$

- 2) 曲げ応力

$$\sigma_B = Mp / Z = 253 \text{ MPa}$$

- 3) ねじれ応力

$$\sigma_{\text{shear}} = Mr / (K_1 \times A^2 \times B) = 80 \text{ MPa}$$

A, B, Z, K_1 はそれぞれ、支持キーの切片の長さ(A=150 mm, B=200 mm), 断面係数($Z = A^2 \times B / 6$), A, により求められる係数(0.224)である。結果は曲げ及びねじれ応力が許容を越える結果となった。モジュール A の支持キーの大きさが A=150 mm, B=200 mm では電磁力に耐えることは難しいが、支持キーを A=200 mm, B=270 mm とすることで、曲げ及びねじれ応力がそれぞれ 106 MPa, 33 MPa に減少し許容値以下にすることが可能である。

＜溶接部＞

1) 引っ張り・圧縮応力

$$\sigma_{\text{軸}} = FN / (2 \times (A+B) \times H) = 9.3 \text{ MPa}$$

2) 曲げ応力

$$\sigma_B = 4.24Mp / (H(A^2+3B(A+H))) = 148 \text{ MPa}$$

3) ねじれ応力

$$\sigma_{\text{shear}} = Mr / (2 \times A \times B \times H) = 33.3 \text{ MPa}$$

A, B, H はそれぞれ, 支持キーの切片の長さ(A=150 mm, B=200 mm), スミ肉溶接の溶接脚長(0.04 m)である. これについては曲げ応力が許容を越え, ねじれ応力は許容値とほぼ同等となっている. モジュール A の支持キーの大きさが A=150 mm, B=200 mm では電磁力に持たないが, 支持キーを A=350 mm, B=450 mm とすることで, 溶接部の曲げ及びせん断応力がそれぞれ 33 MPa, 6.3 MPa に減少し許容値以下にすることが可能である. モジュール A について総合的に, 支持キーの切片の長さ A, B それぞれを 2.4 倍以上にすることで, 電磁力に耐えうる設計となる. 今回は電磁力を推測してブランケットモジュールに加わる応力を解析したが, 詳細設計を行った段階で対象のプラズマを用いての電磁力解析を行った上で上述のような構造解析を行い, 整合性のある設計を行う必要がある.

2.4 遮蔽ブランケットモジュール製作性及び保守性検討

例としてモジュール A の製作性について, 一般遮蔽ブランケットの従来の製作方法[2]をベースに検討した. 製作の流れを図 2.8 に示す. 基本的には一般ブランケットモジュールの従来工法で製作可能であるが, 詳細設計時には冷却水配管のサイズとの兼ね合いで決まる配管の最小曲げ半径や第 1 壁の構造材の形状の製作性等を総合的に検討する必要がある.

保守性については, ECH ポートには他の RF システムが入ることも念頭において設計する必要があることから, ECH ランチャーはそれ自身の遮蔽ブランケットとプラグ部を一体化し, それを引き抜くような保守を行う. 引き抜くに

はポートハンドリング装置を使用する[5]. ブランケットモジュールの交換は、ブランケットとプラグを引き抜いた後にバックプレートとプラグ部を分離し、その後、交換するブランケットモジュールをバックプレートから外し交換する。

3. ECH ランチャープラグ概念設計

ECH ランチャープラグは、RF を放射するミラーや伝送させる導波管、真空及びトリチウムの隔壁としてのトーラス窓とゲートバルブ、ポート周辺に存在する超伝導コイルやトーラス窓を放射線から保護するための遮蔽体からなる。

3.1 設計条件

ECH ランチャープラグの基本仕様を表 3.1 に示す。1 ポートあたり 20~25 MW のパワーをプラズマに入射し、且つ、トーラス窓として使用するダイヤモンドの特性が劣化しない遮蔽条件(表 4.3)及びコイルの放射線からの保護条件(表 4.5)を満足するような設計が必要である。

表 3.1 ECH ランチャーの基本仕様

構造材	SUS316LN(IG)
構造材使用温度(°C)	<500
冷却材	軽水
冷却材入口/出口温度(°C)	100/150
冷却材圧力(MPa)	4
先端ミラー材	DSCuAl25(IG)
ミラー・アーマ材	Be
トロイダル入射角度(°)	25~30
ポロイダル入射角度(°)	$r=0\sim 0.8a$
第一壁表面熱負荷(Ave., MW/m ²)	0.25
導波管サイズ(内径, mm ²)	φ60
導波管数	30~32
窓材	人工ダイヤ(~φ100 x ~2t)
窓耐圧力(気圧)	5
ゲートバルブ耐圧力(気圧)	5

3.2 ECH ランチャープラグ概念設計検討

本概念設計の主目的は、限られたポート空間からプラズマ入射パワー 20~25 MW / 1 port, コイルやトラス窓を放射線による損傷や特性劣化から保護できる遮蔽性能を有する設計が可能かどうかの検討であり、入射角を固定とし、導波管を集合させ、その配置を屈曲構造とした。ECH ランチャープラグ部の概念構造図を図 3.1 に示す。プラグ下面には、ECH ランチャー用のブランケット及びプラグ内に供給する冷却水の母管を配置してある。

3.2.1 先端ミラー

先端ミラーは入射角固定(~15°)とし、SS316LN/IG ベースで表面に DSCu を HIP 等により接合する。ミラーの概略を図 3.2 に示す。この条件で高周波損失の見積もりを行った。RF のミラー面でのジュール損率は、

$$\eta = 400(R_s / Z_0) / \cos\theta \quad (3.1)$$

$$R_s = \sqrt{\pi Z_0 \rho / \lambda} \quad (3.2)$$

と表せる。但し、

Z_0 : 真空中のインピーダンス, 377 Ω

ρ : 電気抵抗率(Cu の場合 $\sim 5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$)

λ : RF の波長(170 GHz の場合 $1.765 \times 10^{-3} \text{ m}$)

θ : RF のミラーへの入射角($\theta=50^\circ$)

ミラー材, ミラー温度をそれぞれ DSCu, 200 °Cとし, 更にミラー面はプラズマからの不純物などが付着する可能性が考えられ, それにより電気抵抗率が増加する可能性があるため, 電気抵抗率にはファクタ 2 を乗じた。その条件で電力損失率を計算すると $\eta=0.43\%$ となる。RF ビームはガウシアン分布を仮定し, ミラー面での RF のビーム半径は約 25 mm, ミラー全体の大きさが $43 \times 140 \text{ cm}^2$ であり, 1 ビームあたり 0.8 MW とすると, ミラーにおける RF による最大及び平均熱負荷は,

$$W_{\text{peak}}=289 \text{ W/cm}^2$$

$$W_{\text{mean}}=18 \text{ W/cm}^2$$

程度となる。従って、ミラーに入射されるパワーを 25 MW とすると、ミラー内に 0.1075 MW の熱が生じる。また、ミラー上の平均核発熱を 7 W/cc(図 4.5) とすると、それにより 0.084 MW の熱がミラー内に生ずる。これらを 17 本のφ10 mm の冷却配管を図 3.2 のように配置し除熱を行うとすると、式 2.3 より冷却水の流速(3 m/sec)、比熱(4291 J/kg/K at 4 MPa, 150 °C)、密度(921.7 kg/m³ at 4 MPa, 150 °C)として計算すると冷却水入口/出口の温度差は 12.2 °C となる。

3.2.2 導波管束配置設計

ジャイロトロンから出力される RF のパワーを 1 MW / 1 gyrotron とし、先端ミラーで反射され、RF パワー 20~25 MW をプラズマへ入射するためには、ジャイロトロンからの伝送効率を 70~80 % と仮定すると 30 本前後の伝送ラインが必要となる。本検討では伝送ラインを 32 本として行った。導波管束配置概念を図 3.1 に示してある。ポート後方から 32 本の導波管を互い違いに 4 列に配列し、中性子ストリーミングを低減させるための屈曲構造を持つような形で 2 列に集合するようにした。導波管は円形もしくは矩形の導波管を想定し、内径は 60 mm もしくは一辺を 60 mm とする。導波管壁の厚さは 10 mm 程度取り、先端付近は肉厚部に冷却配管を設け導波管を冷却する。

3.2.3 プラグ遮蔽体概念設計

ECH ポート近傍にあるコイル及びトラス窓の放射線(主に中性子及びγ線)による損傷や特性劣化を防止するために、導波管を取り囲むような形で遮蔽体をモジュール構造で設ける(図 3.3)。SS316LN/IG の構造体と冷却配管からなり、遮蔽解析結果(遮蔽解析については次章を参照)を基に得た遮蔽体の最大発熱率は、例えば図 4.5 の右側先端付近で厚さ 100 mm 程度の箇所は 2~5 W/cc、厚さが 300 mm 程度の箇所では 0.01 W/cc となることから、遮蔽体内部に冷却配管を設け冷却する(図 3.4)。

3.3 ECH ランチャープラグ製作性及び保守性検討

遮蔽体は幾つかのモジュール構造をしているが、各々は比較的構造がシンプルなため、冷却配管も含めて一般的な機械・切削加工及び TIG 溶接などにより製作可能である。保守については先述の通り、遮蔽ブランケットと一体化したプラグを共通のポートハンドリング装置[4]でつかみ出しキャスク内へ持ち込み、遮蔽ブランケットとポートプラグ部とに分解し、それぞれの交換や保守などを行う。

4. ECH ランチャー 2 次元遮蔽解析

先述の遮蔽ブランケット及びプラグ部の概念設計検討を基に 2 次元の遮蔽解析用モデルを作成し、遮蔽条件を満たす設計指針を得るべく解析を行った。

4.1 計算方法及び解析条件

設計検討を行った ECH ポートに対して 2 次元輸送計算コード(DOT 3.5)[6]を用いて中性子束・ γ 線束空間分布等を求めた。中性子束・ γ 線束から各種反応率への変換には APLLE-3[7]を使用した。計算モデルを図 4-1 に示すが、2 次元モデルである為、高さ方向(紙面に垂直方向)には無限大となり、従って、導波管はスリット状に置き換る。図中の斜線部は遮蔽ブランケット或いは遮蔽体を表しており、それ以外は空間である。計算で使用した諸定数等を表 4.1 に示す。図 4.1 中の X1, X2(遮蔽プラグの厚さ), Y1, Y2(屈曲構造の形状)をパラメータとして計算を行った。また、遮蔽ブランケット及びプラグ部遮蔽体の SS316LN/H₂O 構成比はそれぞれ 80/20, 60/40 とした。超伝導コイル材などの組成割合は ITER で使用されているものを使用した。遮蔽性能基準値は計算結果の表に記してある。

4.2 計算結果

計算を行う上で、4th leg への深さ(図 4-1 で Y=50 からマイナス方向の長さ)を 2nd leg の導波管径(60 mm)の 2 倍以上取ることにより屈曲構造による最適な遮蔽性能が得られることを考慮した。表 4.2 に計算ケースの代表例を示す。X1 及び 4th leg #3, 4 への深さはそれぞれ 740 mm, 730 mm, 930 mm である。

図 4.2~4.4 に 4th leg の深さを導波管径の 2 倍以上取った Case B の高速中性子フラックス分布, γ 線フラックス分布, Y=0 における X 方向の中性子及び γ 線フラックス分布を示す. 図 4.2 のポート内の高速中性子(>0.1 MeV)フラックス分布を見てみると, 導波管等の空間部で中性子線のストリーミング成分が顕著に現れていることが判る. また, 屈曲構造により, プラグ後方に伝搬していく中性子が減衰していることも判る. 図 4.3 には γ 線のフラックス分布を示してあるが, これも図 4.2 とほぼ同じ分布をしている. 図 4.4 に Y=0(ポート中心)における X 方向の中性子及び γ 線のフラックスの変化を示す. ポート内の遮蔽体端部と圧力閉止板の間の空間においては, 中性子及び γ 線のフラックスは殆ど減衰しないか, 或いはむしろ上昇している. これは, 導波管内のストリーミングと回り込みの中性子の影響である.

表 4.1 計算で使用了した諸定数等

中性子線源強度	FWの中性子壁負荷を1MW/m ² として規格化
中性子輸送計算用核定数	中性子線42群, ガンマ線21群 P5 JAERI-M 91-072
FUSION-40 ルジャンドル展開次数	
JENDEL-3ベース	
空間角度分割	等方160角度分割
核反応断面積	APPLE-3ライブラリ JAERI-Data/Code 97-002 JAERI-M 93-175
ケルマ定数, 吸収線量	
弾き出し断面積 H・He生成断面積	

表 4.2 計算ケース

Case A			Case B			Case C		
X2(cm)	Y1(cm)	Y2(cm)	X2(cm)	Y1(cm)	Y2(cm)	X2(cm)	Y1(cm)	Y2(cm)
50	9.75	19.5	50	30	50	185	30	50

表 4.3~4.5 に窓位置での遮蔽性能, ダイヤモンド窓の照射特性, トロイダルコイル位置での遮蔽性能を示す. 表 4.3 において, Case A と B を比較して明らかかなように, Y1, Y2 の深さを深くする(導波管径の 2 倍以上取ることが望ましい)ことで遮蔽性能が向上していることが判る. また, Case C のようにポートプラグ内の遮蔽体を厚くすれば当然のことながら遮蔽性能は向上するが,

表 4.3 窓位置での照射特性

(上段: 高速中性子, >0.1MeV 下段: 全中性子)

Case	中性子フラックス (n/cm ² /s)	中性子フルエンス (n/cm ²)	窓位置の基準値 (n/cm ² /s)	γ線フラックス (γ/cm ² /s)
A	<1.2 x 10 ⁹	<4 x 10 ¹⁶	<1 x 10 ¹⁶	<1.1 x 10 ¹⁰
	<6 x 10 ⁹	<2 x 10 ¹⁷	<1 x 10 ¹⁶	
B	<8 x 10 ⁷	<2.5 x 10 ¹⁵	<1 x 10 ¹⁶	<7 x 10 ⁸
	<3 x 10 ⁸	<9.5 x 10 ¹⁵	<1 x 10 ¹⁶	
C	<7 x 10 ⁶	<2.2 x 10 ¹⁴	<1 x 10 ¹⁶	<4x 10 ⁷
	<2 x 10 ⁷	<6.3 x 10 ¹⁴	<1 x 10 ¹⁶	

その分, ポートに加わる重量が増加するため, ポートの許容荷重との調整を行いながら最適な遮蔽設計を行う必要がある. 表 4.4 には Case B のダイヤモンド窓の照射特性を記してあるが, 核発熱は無視しうる程小さく, また, 他の特性値も小さい値であるが, それらが, ダイヤモンド窓の高周波特性や強度などにどのような影響を及ぼすかは, ダイヤモンドの中性子照射実験等で評価する必要がある. また, 表 4.5 に Case A でのコイルの遮蔽性能結果が示してあるが, いずれの照射特性値も条件を十分に満足しており, コイルに対する遮蔽には裕度がある. 図 4.5 に Case A の計算結果を基に算出した核発熱率分布を示す. 先端ミラーはプラズマを直視するために, ブランケットモジュール前側面と同程度の核発熱が生じることが判る. また, ポート前面は導波管周辺も比較的核発熱率が高くなっている. 内/外径が 80 mm/60 mm を考慮すると導波管の 1st leg の核発熱は数 kW となり冷却が必要である. 以上の結果から, 遮蔽性能を上げるために, 図 4.1 上において最適な 2nd leg(X)の長さ及び 4th leg への深さ(Y)を選択し設計することが重要であることを確認した.

表 4.4 ダイヤモンド窓照射特性(Case B)

(1FPY=1MWa/m²)

	照射特性
核発熱率	<1.2 x 10 ⁻⁵ W/cm ³
吸収線量	<1.1 x 10 ³ kGy/FPY
弾き出し損傷	<1.1 x 10 ⁻⁶ dpa/FPY
ヘリウム生成	<2 x 10 ⁻⁴ appm/FPY
水素生成	<4 x 10 ⁻⁸ appm/FPY

表 4.5 Case A でのコイルの遮蔽特性

		遮蔽特性	コイルの基準値
NbSn超伝導材中性子フルエンス		<3.2 x 10 ¹⁵ n/cm ²	<1 x 10 ¹⁹ n/cm ²
電気絶縁材吸収線量(エポキシ)		<3.8 x 10 ⁴ Gy	<3 x 10 ⁶ Gy
安定化銅の弾き出し損傷		<4 x 10 ⁻⁶ dpa	<5 x 10 ⁻⁴ dpa
核発熱率	超伝導線	<0.004 mW/cm ³	<1 mW/cm ³
	コイルケース	<0.04 mW/cm ³	<2 mW/cm ³
総核発熱量(渦電流損含)		3.52 W/m (注1)	17 kW (注2)
	超伝導部	0.67 W/m	
	コイルケース	2.85 W/m	

(注1) ECHポート左右2つのトロイダルコイル1mの高さに対する合計値

(注2) 全ての超伝導コイル(トロイダル・ポロイダル)の合計発熱量

5. まとめ

プラズマ入射 20~25 MW / 1 port が可能であり、コイルやトラス窓を放射線による損傷や特性劣化から保護できる遮蔽性能を満足するような核融合炉用 ECH ランチャーの概念設計検討を行った。ECH ランチャー先端には、RF 入射用スロットを有する専用の遮蔽ブランケットを設けるが、幾つかのブランケットモジュールに分割し、それぞれを ECH ポート用バックプレートにスミ肉溶接などで取り付ける設計とした。このモジュールには、ITER 等で設計が進められている一般ブランケットモジュールの設計概念を適用し、検討した結果、より詳細に検討すべき部分はあるものの製作は可能であるという判断に至った。ランチャープラグ部については、アンテナの役割をする先端ミラーの熱負荷や

除熱量，遮蔽性能を向上させるための導波管束の配置(屈曲構造)，遮蔽体ブロックの保守性等を考慮した配置を検討し，今後の詳細設計に必要な情報を取得した．遮蔽ブランケット及びランチャープラグ部の概念設計を基に 2 次元遮蔽解析を行った．導波管束の屈曲構造を最適化することで，窓及びコイルに対する遮蔽条件を満足することが判明した．今後の ECH ランチャーの詳細設計に有用となる ECH ランチャー用ブランケットやランチャープラグ内機器の設計指針，遮蔽条件を満足する ECH ランチャーの遮蔽設計方針を取得した．

謝辞

本設計検討を行うにあたり，終始，有意義な議論及び教示を戴きました坂本慶司主任研究員及び RF 加熱研究室員，ブランケット工学研究室・黒田敏公氏に感謝致します．また，本設計研究を行うにあたり，ご支援を戴きました関昌弘部長及び松田慎三郎所長に感謝を申し上げます．

参考文献

- [1] ITER-FEAT Outline Design Report (1999)
- [2] Technical Basis for the IER Final Design Report (FDR) (1997)
- [3] 機械工学便覧 改訂第6版, p4-90, p17-102, 日本機会学会編
- [4] 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課監修, 発電用原子力技術基準, 火力原子力発電技術協会 (1992)
- [5] 佐藤真一, 他 保守ポート内機器の遠隔保守装置, ロボティクス・メカトロニクス講演会 98 (1998)
- [6] W. A. Rhoades and F. R. Mynatt, “ The DOT-III Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code “, ORLN-TM-4280 (1973)
- [7] 川崎弘光, 他 APPLE-3: 中性子束, ガンマ線束, スペクトル, 反応率分布のプロットングコード APPLE の改良とマニュアルの整備, JAERI-M91-058 (1991)

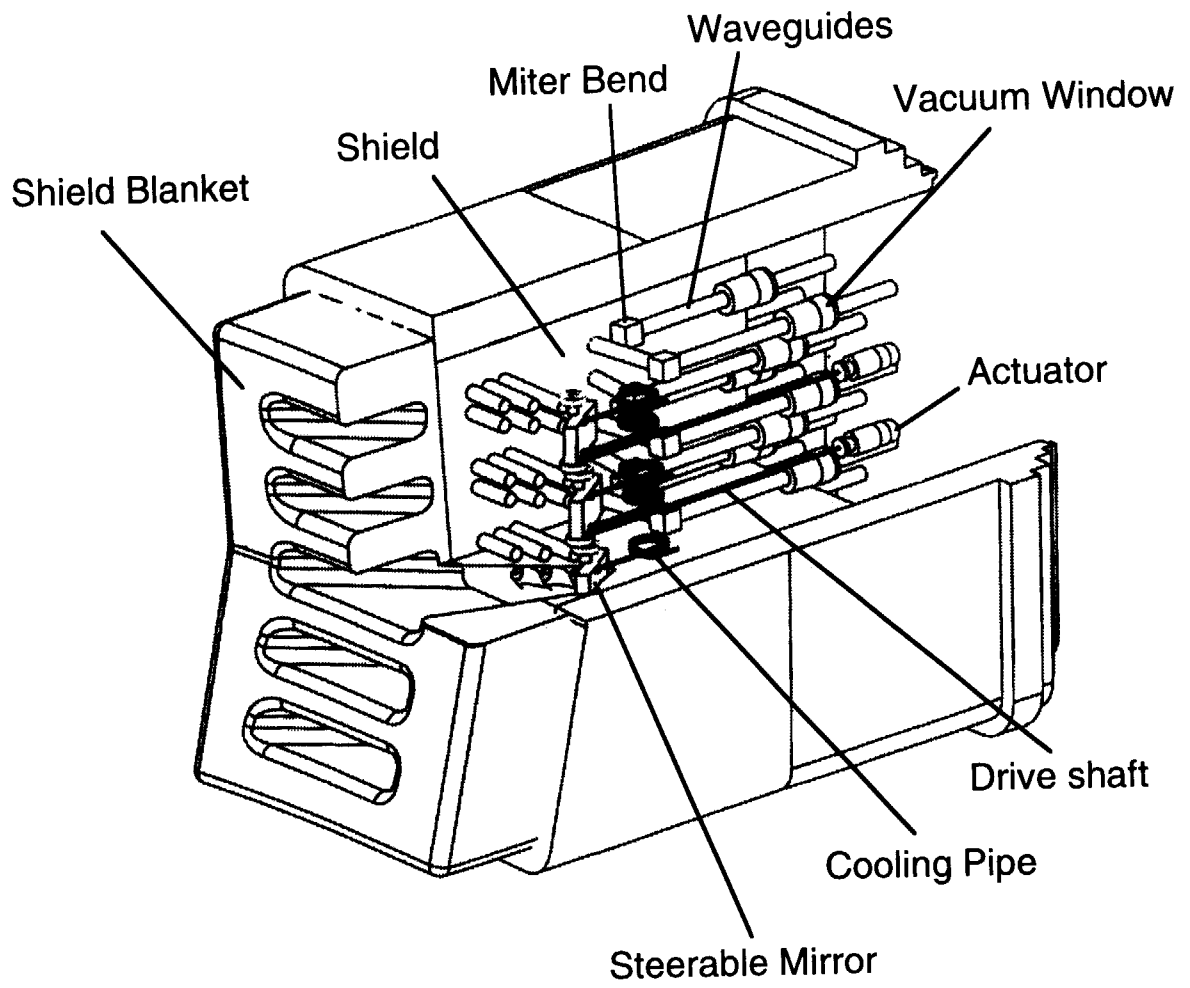


図1 ECHランチャー構造概念図(文献1)

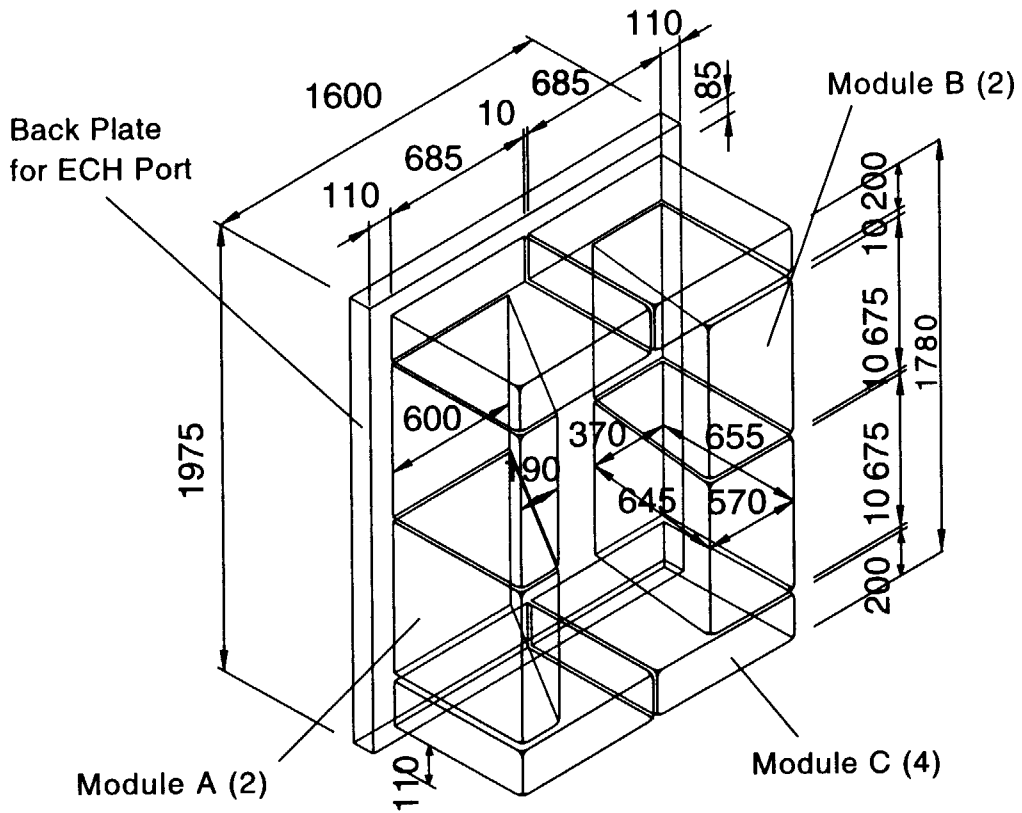


図2.1 ECHランチャー遮蔽ブランケット構造概念図モジュールA, B, Cの3種類、全部で8個からなる。括弧内に各モジュールの個数が示してある。

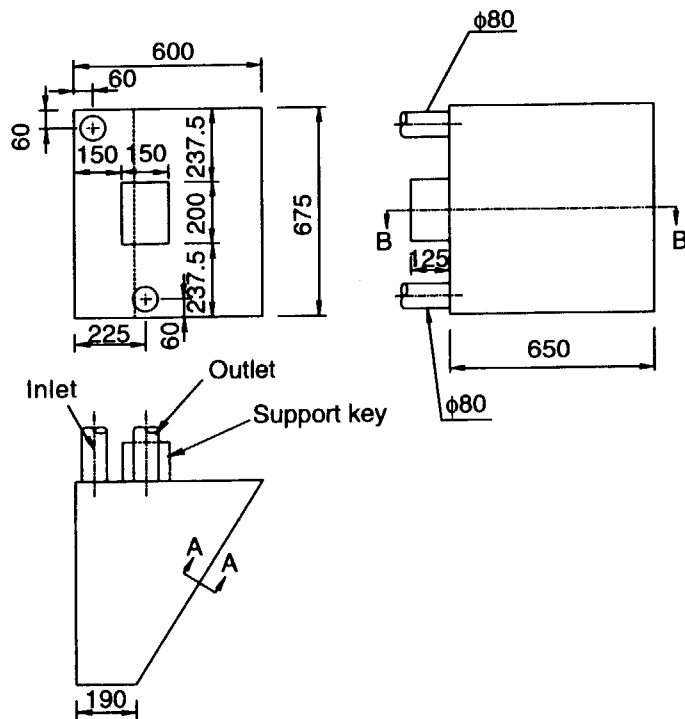


図2.2 ブランケットモジュールA構造概念図

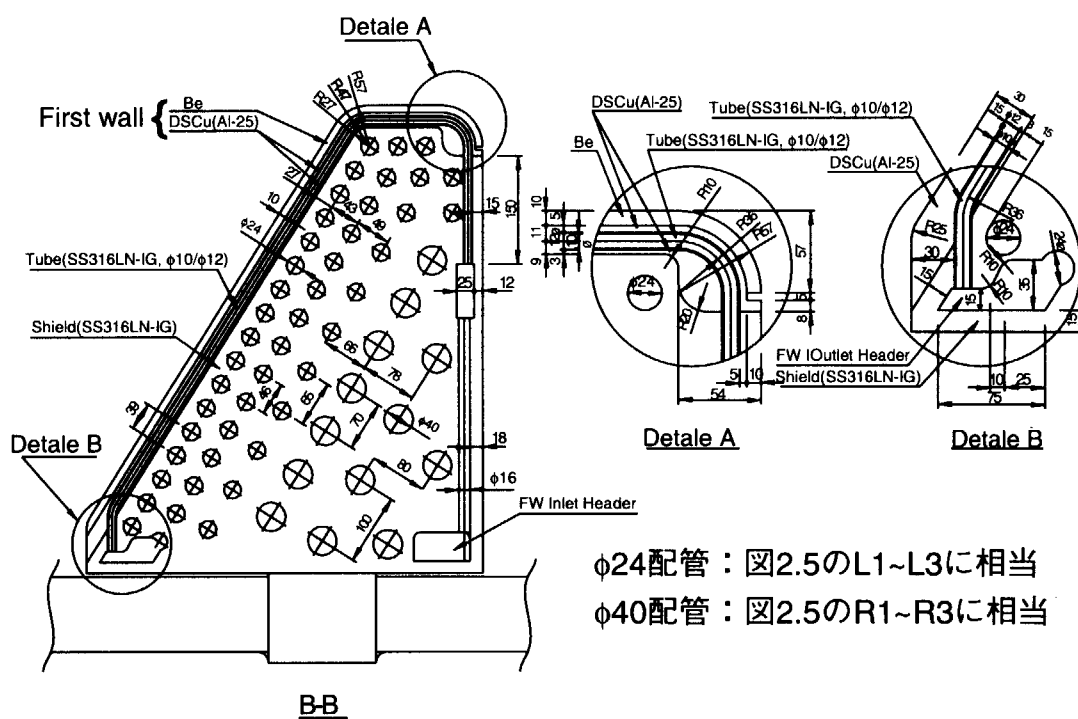


図2.3 モジュールA詳細構造図

第1壁のヒートシンク材はトロイダル方向と平行に、その内側及び構造母材はポロイダル方向と平行に冷却水配管を配置。

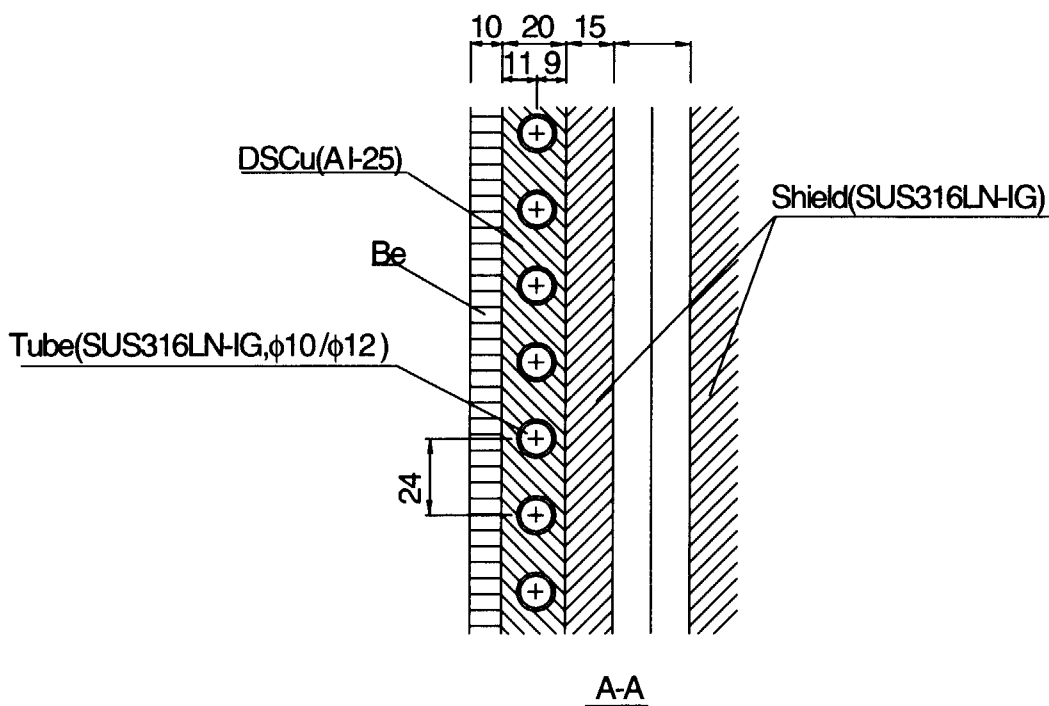


図2.4 第1壁部構造概念図

ヒートシンク材としてアルミナ分散強化銅を、構造母材としてSS316LN-IGを使用する。

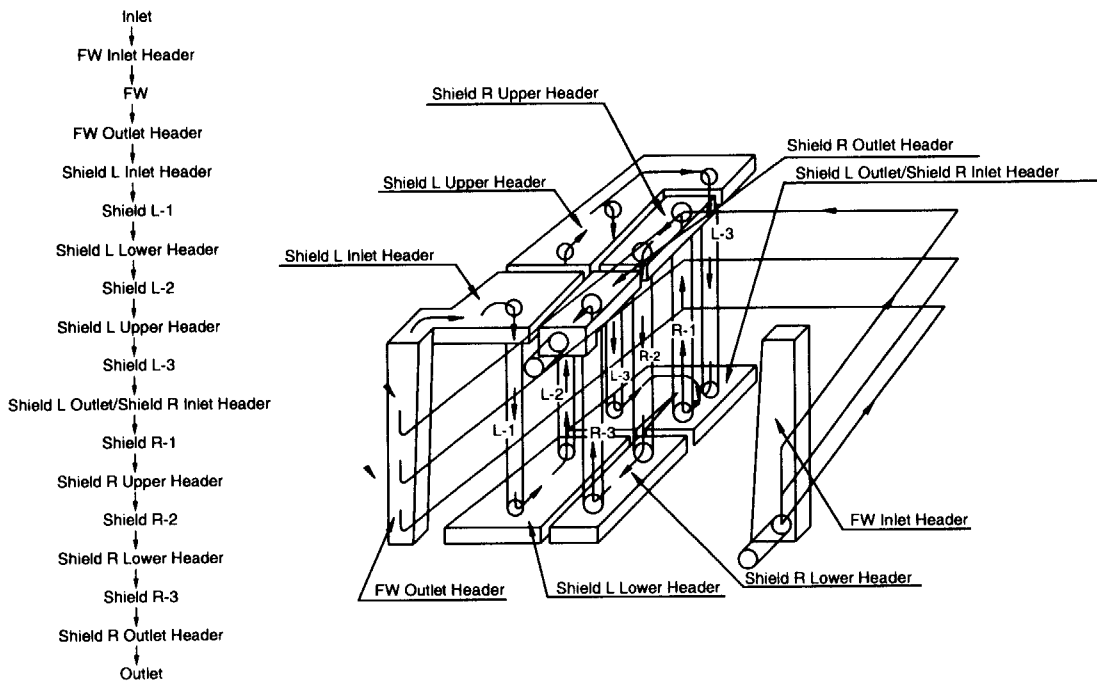


図2.5 ブランケットモジュールAの冷却水流路検討図
第1壁、構造母材の順に流路をシリーズにする。

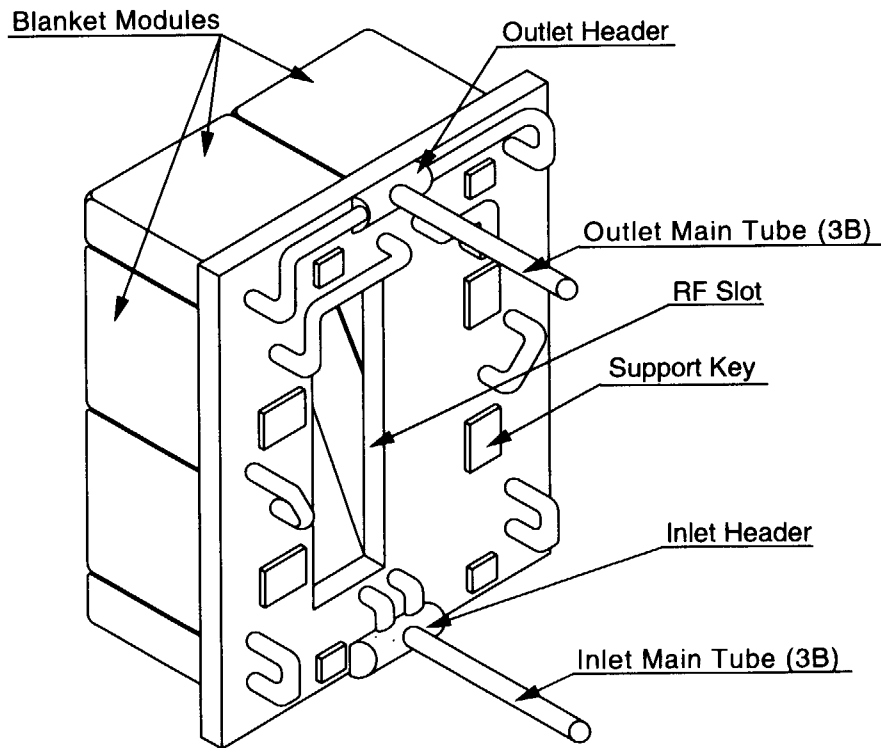
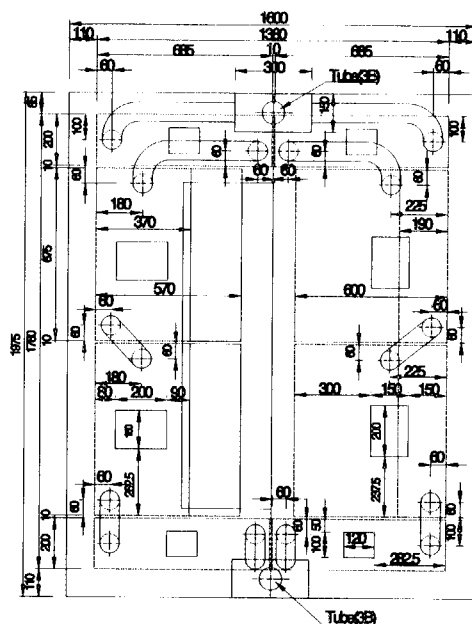


図2.6 ブランケットモジュール冷却水配管取り合い検討図



Note :
Tube diameter is 2 1/2B Unless stated.

図2.7 ブランケットモジュール冷却水配管取り合い詳細図

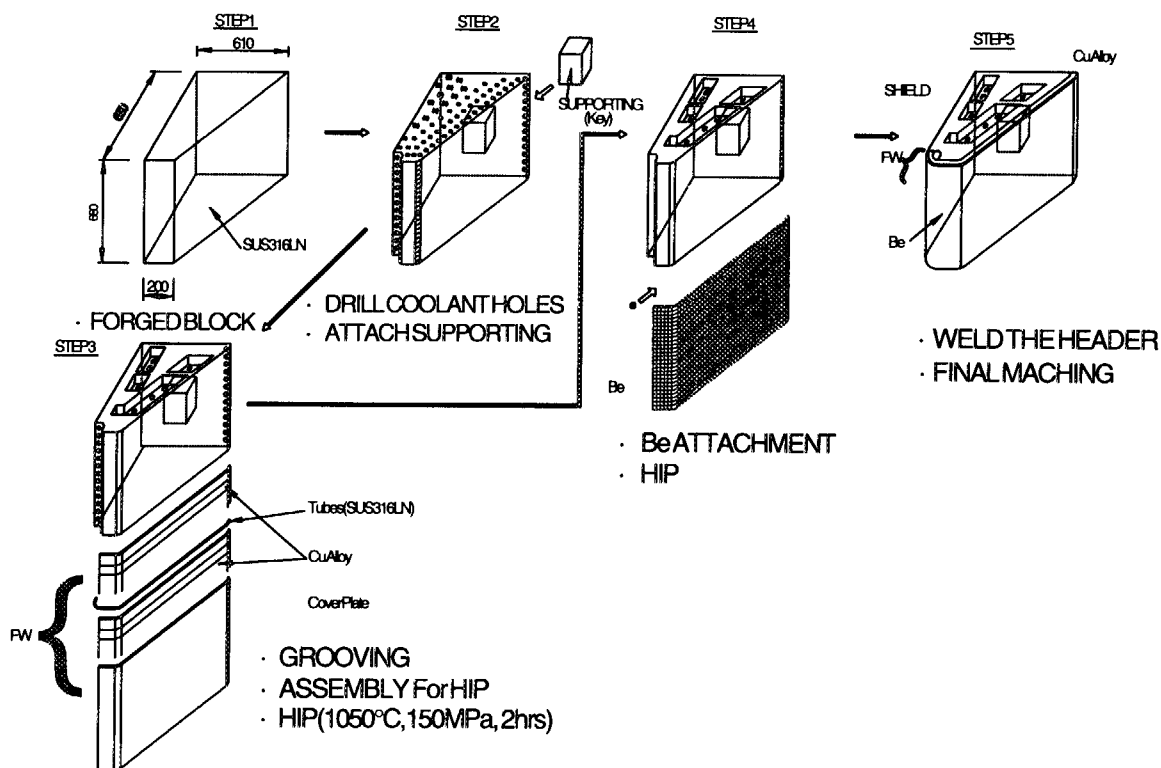


図2.8 ブランケットモジュールA製作検討図

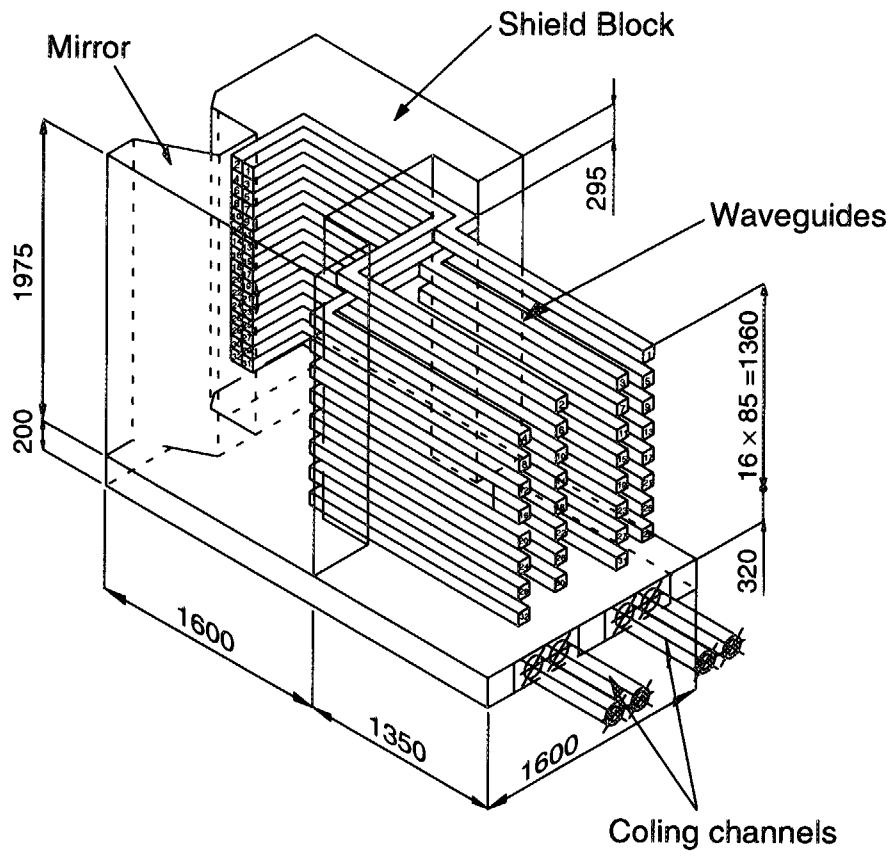


図3.1 ランチャープラグ構造概念図

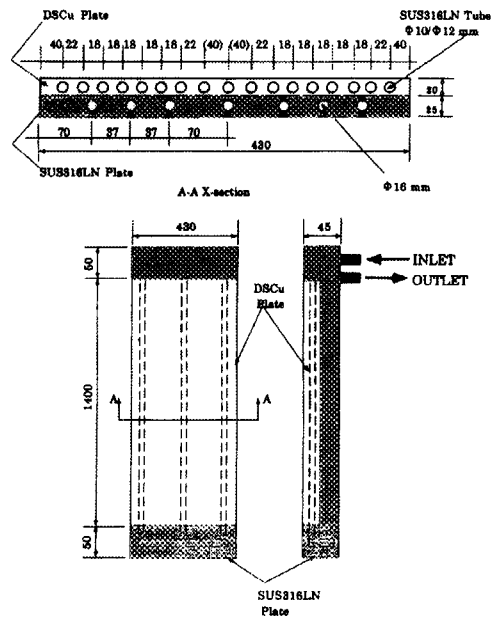


図3.2 先端アンテナミラー構造概念図

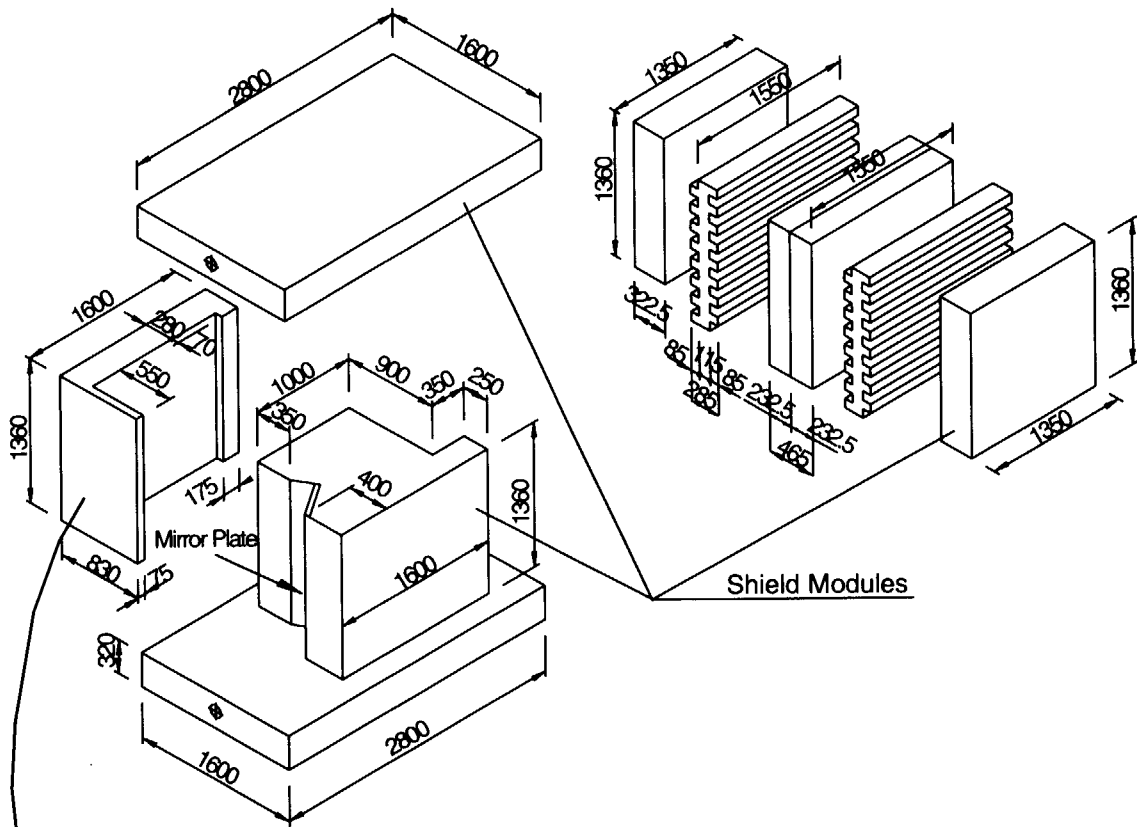


図3.3 遮蔽体モジュール分割検討図

この部分に対応

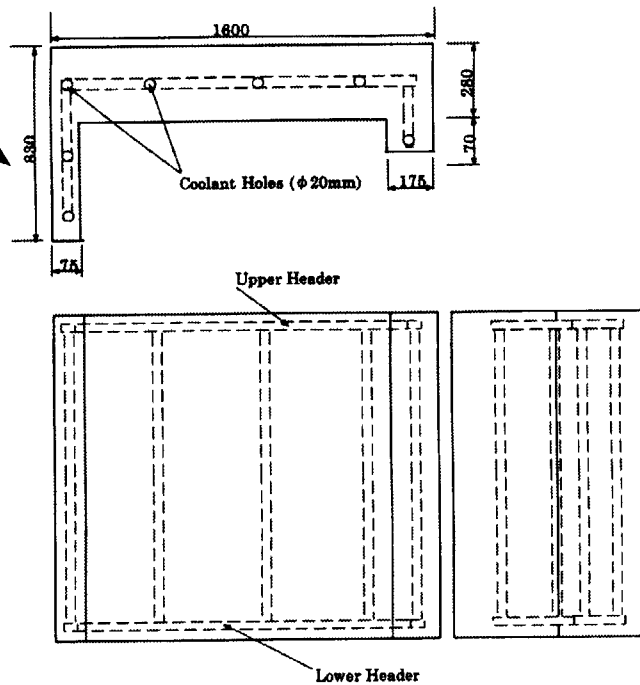


図3.4 遮蔽体モジュール冷却配管検討図(例)

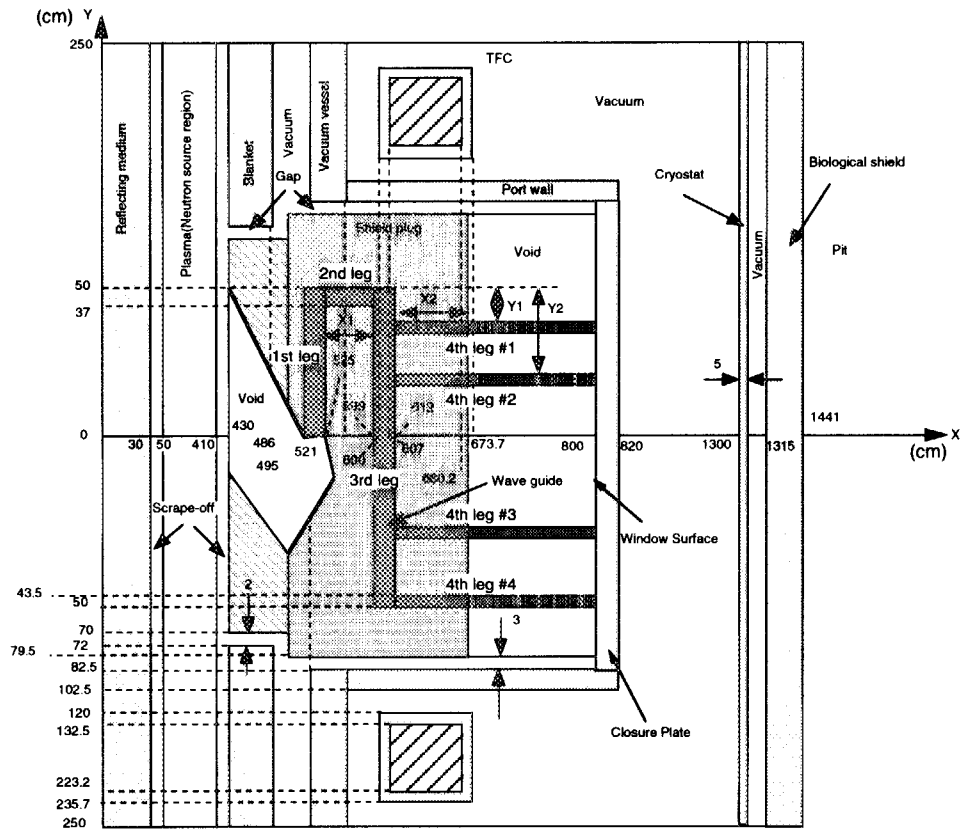


図4.1 遮蔽計算モデル

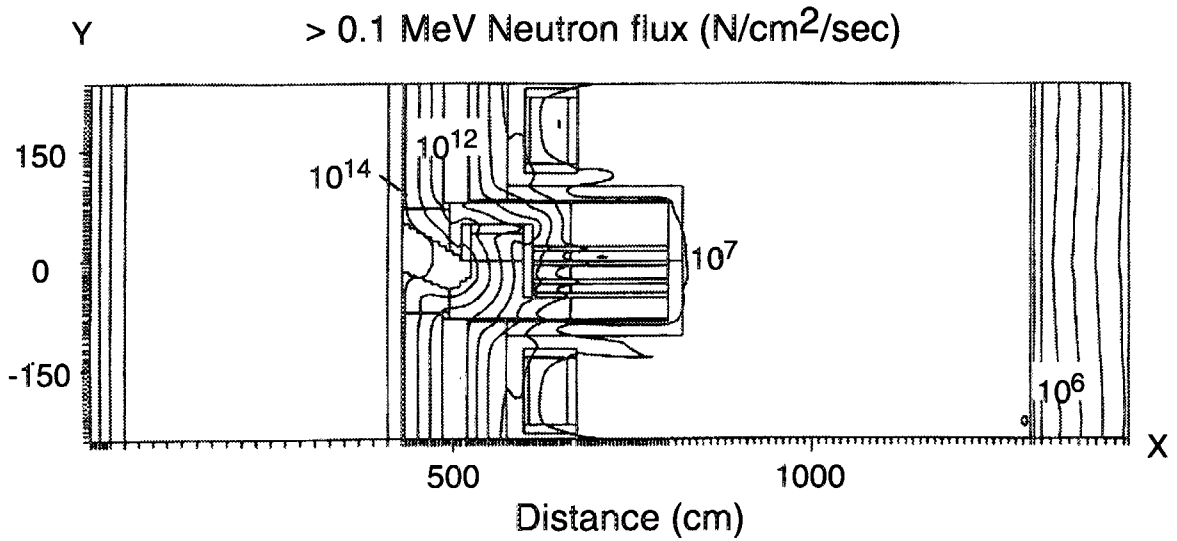


図4.2 高速中性子束分布(Case B)
導波管の屈曲構造による遮蔽効果とストリーミング効果が明確に現れている。

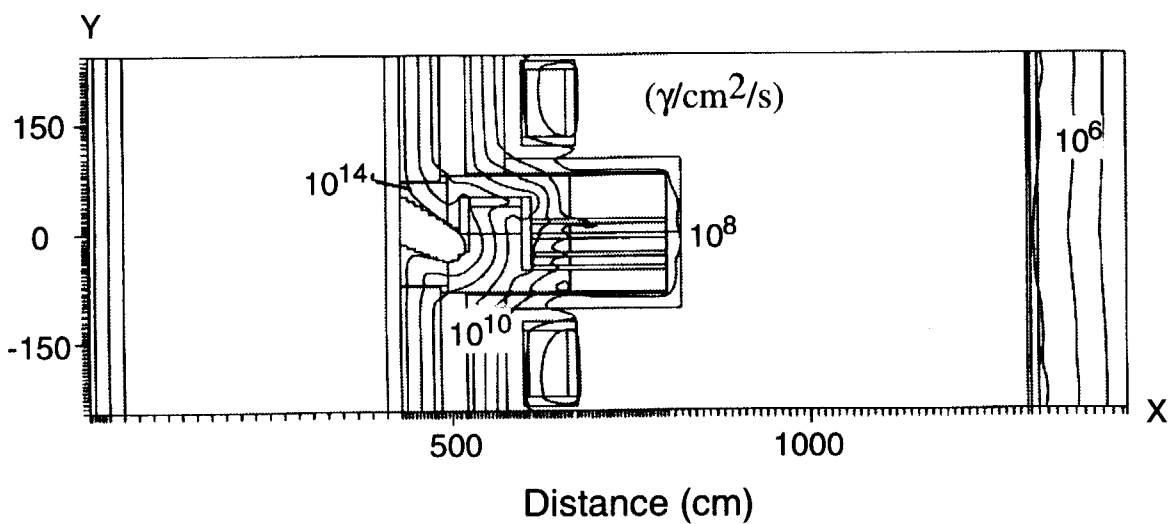


図4.3 γ 線フラックス分布等高線(Case B)

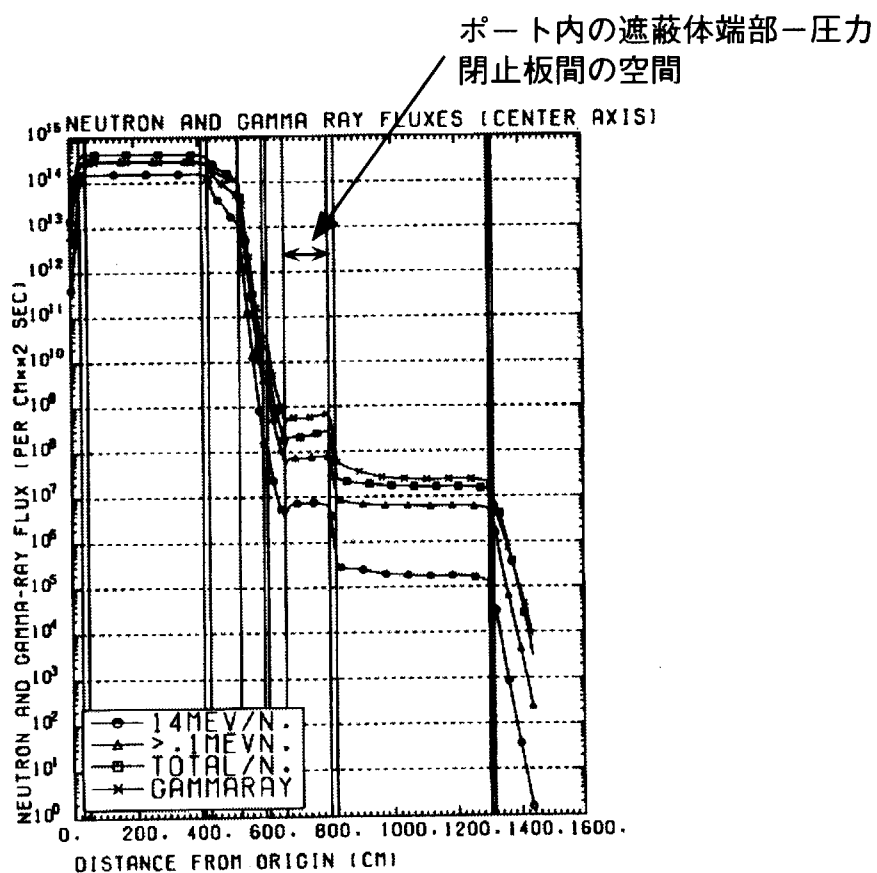


図4.4 中性子、 γ 線フラックスECHポート軸方向分布(Case B)
 遮蔽体-圧力閉止板間はストリーミング効果により中性子フラックスが減少せず、むしろ周囲から回り込む中性子束の影響のため若干上昇している。

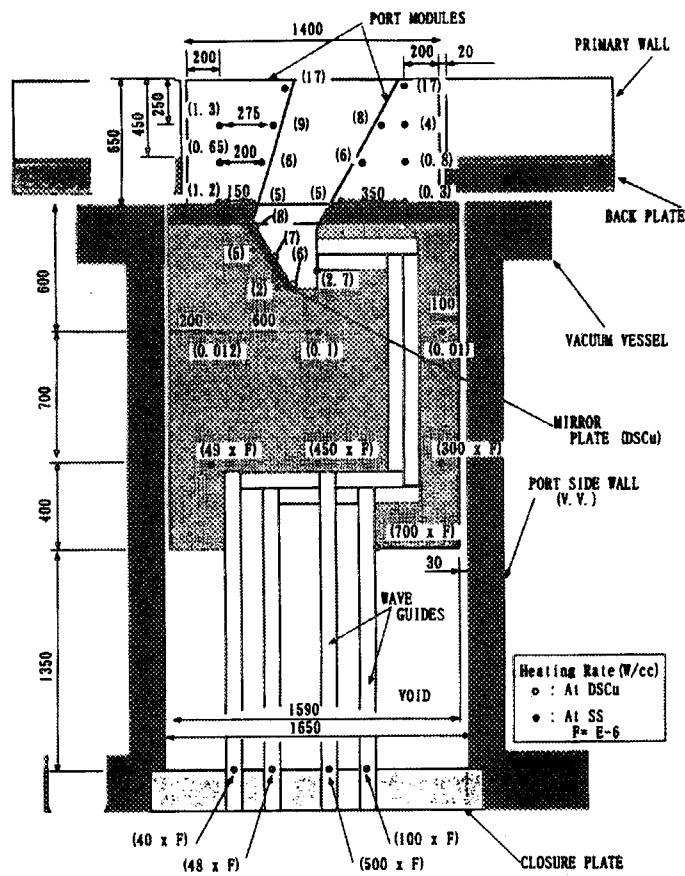


図4.5 ポートプラグ内核発熱率分布(Case A)
先端ミラーはスロット内面と同等の核発熱が生ずる。

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換 算 表

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

粘 度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

核融合実験炉におけるECHランチャーの中性子遮蔽概念設計