

JAERI - M
92-108

ダイバータ支持構造設計

1992年7月

岡崎 隆司・西尾 敏・渋谷 正直
小泉 興一・清水 克祐・佐々木 崇
多田 栄介

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, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

ダイバータ支持構造設計

日本原子力研究所那珂研究所 I T E R 開発室

岡崎 隆司・西尾 敏⁺・渋井 正直・小泉 興一

清水 克祐・佐々木 崇・多田 栄介⁺

(1992年7月1日受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータ支持構造体の概念設計を行った。ダイバータ支持構造体はダイバータ板とダイバータ遮蔽体を連ぐもので、機械的強度を持たせるために、杵組構造とする。ダイバータ遮蔽体からのダイバータ板と上記支持構造体との脱着には水圧コッターを用いる。ダイバータ遮蔽体に、上記杵を納める台形状の突部を設け、上記杵を挿入する時のガイドと遮蔽性能向上の役目をする。この概念を基に、実規模部分モデルを試作して、分解修理時のダイバータ脱着機能の有効性を確認した。

Design of Divertor Support Structure

Takashi OKAZAKI, Satoshi NISHIO⁺, Masanao SHIBUI
Koichi KOIZUMI, Katsusuke SHIMIZU, Takashi SASAKI
and Eisuke TADA⁺

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

(Received July 1, 1992)

Conceptual design of a divertor support has been done for the ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). The divertor support has a function to connect a divertor plate with a divertor structure and is made in a frame structure from the mechanical point of view. Hydraulic cotter can be used in jucking up and down the divertor support and plate for its maintenance. Based on this concept, a full-scale partial model has been manufactured to test the jucking up and down function. The model shows the validity of the function.

Keywords: ITER, Divertor, Divertor Support, Hydraulic Cotter

⁺ Reactor Structure Laboratory,
Department of Fusion Engineering Research

目 次

1. はじめに	1
2. ダイバータの設計条件	2
2.1 設計条件	2
2.2 ITER CDAのダイバータ設計	2
3. 構造設計の特徴	11
3.1 設計課題	11
3.2 設計の特徴	11
4. 各部構造設計	15
4.1 ダイバータ支持枠	15
4.2 ダイバータ遮蔽体	18
4.3 ダイバータ脱着機構	18
4.4 上側ダイバータ構造	19
4.5 冷却管ヘッダ周りの構造	19
5. 構造解析	39
5.1 ダイバータ板の電磁力・応力解析	39
5.2 ダイバータ支持枠の電磁力・応力解析	39
6. 試作開発	49
6.1 駆動機構とコッターの設計	49
6.2 駆動機構の試作と試験	49
6.3 実規模ダイバータ支持構造体の試作	50
6.4 実規模ダイバータ支持構造体の試験	53
7. まとめと今後の課題	61
謝 辞	62
参考文献	62

Contents

1. Introduction	1
2. Divertor Design Specifications	2
2.1 Design Specifications	2
2.2 Divertor Design in ITER CDA	2
3. Characteristic of Structure Design	11
3.1 Design Issues	11
3.2 Characteristic of Design	11
4. Structure Design of Each Part	15
4.1 Divertor Support Frame	15
4.2 Shield Structure	18
4.3 Mantle and Dismantle Mechanism of Divertor	18
4.4 Upper Divertor Structure	19
4.5 Structure Around Coolant Tube Header	19
5. Structure Analysis	39
5.1 Analysis of Electromagnetic Force and Stress for Divertor Plate	39
5.2 Analysis of Electromagnetic Force and Stress for Divertor Support	39
6. Trial Manufacture and Development	49
6.1 Design of Drive Mechanism and Cotter	49
6.2 Trial Manufacture of the Driver and Its Test	49
6.3 Trial Manufacture of Real-scale Divertor Frame Structure ...	50
6.4 Test of Real-scale Divertor Frame Structure	53
7. Summary and Future Study	61
Acknowledgement	62
Reference	62

1. はじめに

近年、プラズマ物理の著しい進歩を背景に、核融合実験炉の設計研究が盛んに行われている。特に、国際熱核融合実験炉ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) においては、1988年から3年間の概念設計活動CDA (Conceptual Design Activity)を終えて、新たな工学設計活動EDA (Engineering Design Activity)の段階へと進みつつある。本報では、国際熱核融合実験炉ITERの機器の中で、プラズマ対向機器の1つとして、使用条件の厳しいダイバータに着目し、CDAで得られた設計の見直しを行う。

ダイバータは、核融合反応を起こさせるために磁力線で閉じ込めていたプラズマが外に逃げて直接第一壁に当たる割合を減らすために、プラズマ周辺の磁力線を制御して逃げ出したプラズマを特定の壁に導き、そこに当て、そこから発生する不純物やプラズマ中に含まれていた不純物を排気する役目をするものである。一般に、ダイバータとはプラズマからの熱・粒子が当たる特定の壁(ダイバータ板)を中心としたコンポーネントを意味する。ここでは、ダイバータを次の3つに分けて考える。すなわち、(1)ダイバータ板、(2)ダイバータを置く遮蔽体、(3)ダイバータ板と上記遮蔽体との間に位置し、ダイバータ板を支持しそれを上記遮蔽体に固定する支持構造体、である。従来、ダイバータの設計研究は、ダイバータ板の研究が多かった。CDAの設計研究においてもダイバータ板に重点が置かれた。本報の目的は、従来検討が十分ではなかったダイバータ支持構造体の概念を明らかにすることである。

ダイバータ支持構造体の役目は、ダイバータ板の支持に加えて、(1)ダイバータ板の熱延び吸収、(2)ディスラプション時の電磁力保持、(3)ダイバータ板の遮蔽体からの脱着機構等である。以下ではこれらの項目について示していく。

2. ダイバータの設計条件

2.1 設計条件

ITERで定めたダイバータの設計条件をTable 2.1に示す¹⁾。ITERでは運転条件を物理フェーズと工学フェーズに分けて、運転する。このダイバータには、通常運転時に $15\sim 30\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷がある。ディスラプション時には、 $10\sim 20\text{MJ}/\text{m}^2$ の熱負荷がある。いずれの時には、ダイバータは健全性を維持する必要があり、ダイバータは炉構造機器の中で最も苛酷な運転条件にさらされる。

このような運転条件下なのでダイバータ板の損耗が多く、交換頻度は1年に1回以上と予測されている。従って、Table 2.1の設計条件に加えて、交換可能な構造にするという条件が加わる。

2.2 ITER CDAのダイバータ設計

(1) 全体概要

上記設計条件に基づき、ITER CDAで行ったダイバータの設計を例に採り、その構造を示す。Fig. 2.1にダイバータ構造を示す。図中(a)はトラスを32分割した時の1モジュールを示す。(b)はダイバータ板をカーボンのモノブロック型で冷却する場合の設計例である。(c)はポロイダル断面で、磁力線に沿ってくるプラズマからの熱・粒子負荷とダイバータ板との位置関係を示す。

ダイバータ構造としては、ダイバータ板は冷却管とアーマ材とで構成され、電磁力軽減の観点からトロイダル方向に細分割され、各々が電気絶縁支持されている。アーマ材には炭素材、構造材料には銅合金、モリブデン合金等が用いられる。アーマ材は主にディスラプション時の熱負荷によって損耗する。そこで、熱負荷を実効的に軽減しアーマ材の寿命をのばすために、ダイバータ板に当たる磁力線を掃引して熱流分散を行う。ダイバータ板の冷却は低温水（温度 $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）で行い、バーン・アウトに対する安全率を高めるため冷却管内にらせん状の金属製テープが挿入される。

(2) 詳細構造

ダイバータの構造をもう少し詳細に示す。Fig. 2.2はモノブロック型ではあるが、カーボンのアーマ1つに対して、2本の冷却管を設置したものである。冷却管の総数は32本である。Fig. 2.3はモノブロック型の中で、アーマ1つに対して、1本の冷却管を設置したものである。図中には、ダイバータ交換の際、ダイバータを把持するフックも示している。以下では、上記2者には構造上大きな違いはないのでアーマ1つに対し1本の冷却管を設置した場合について示す。Fig. 2.4はダイバータ板を取り去ったあとのダイバータ板熱延び吸収の構造を示す。熱延びを板バネで吸収する考えである。Fig. 2.5にダイバータ板を支持するダイバータ支持構造体の構造を示す。ダイバータ支持構造体の横板は冷却管で連結されている。Fig. 2.6は上記支持構造体

と一体となったダイバータ板を交換する際の、脱着用のロック機構を示す。上記支持構造体のロックには4個の水圧コッターを用い、上記支持構造体のジャッキアップには3個の水圧コッターを用いる。Fig. 2.7はロック機構の断面図を示す。Fig. 2.8はジャッキアップ機構の断面図を示す。

ダイバータ支持構造体については、上記の他に、Fig. 2.9, Fig. 2.10に示す案も考えられた。これらはディスラプション時の電磁力を低減するために、いずれも電気絶縁の仕方を工夫している²⁾。

ダイバータ板表面は0.1mmの精度で合わす必要があることから、多少の設置誤差があっても、構造で対策するFig. 2.11に示す構造も提案されている³⁾。

Table 2.1 Main design parameters for the ITER divertor

Operation phase		Physics	Technology
<u>Normal Operation</u>			
- Aver. neutron wall load	MW/m ²	0.5	0.4
- Peak/aver. surface heat flux,	MW/m ²	15-30/0.6	15-30/0.6
- Peak volumetric heat load in structure	MW/m ³	5	4
- Number of pulses (full load)	10 ⁴	1	2-5
- Total burn time	h	400	10 ⁴ -3×10 ⁴
- Peak neutron damage (steel)	dpa	0.3	5-15
- Min. dwell time	s	200	200
- Incident DT-ions:			
• peak flux	10 ²⁰ /m ² s	4000	4000
• energy	eV	50-100	60-200
- Allowed water leak g/s	g/s	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
<u>Disruptions</u>			
- Number (at full load)		500	200-500
- Thermal quench: • time	ms	0.1-3	0.1-3
• peak energy depos.,	MJ/m ²	10-20	10-20
- Current quench: • time	ms	5-100	5-100
• radiative energy depos.	MJ/m ²	2	2
• run-away elect. energy deposit (at ≤ 300 MeV)	MJ/m ²	30	30
<u>Materials</u>			
- Armor			
• reference		C-fibre comp.	W
• alternative		Be	C, Be
• peak temperature	°C	1000	1500
• baking/conditioning temp.	°C	350/150	200/150
- Structure			
• reference		Mo-alloy	Nb-alloy
• alternative		Nb-alloy	Mo-alloy
• alternative		DS-Cu	DS-Cu
- Coolant		Water	Water
• Inlet temperature	°C	60	60
• Inlet pressure	MPa	3.5	3.5

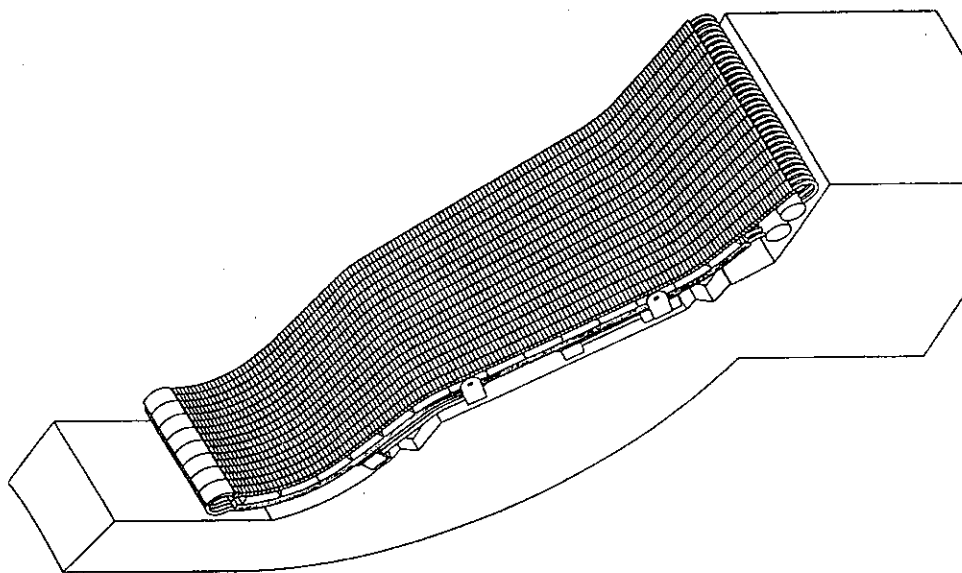


Fig. 2.2 Overall divertor configuration
(two tubes per armor)

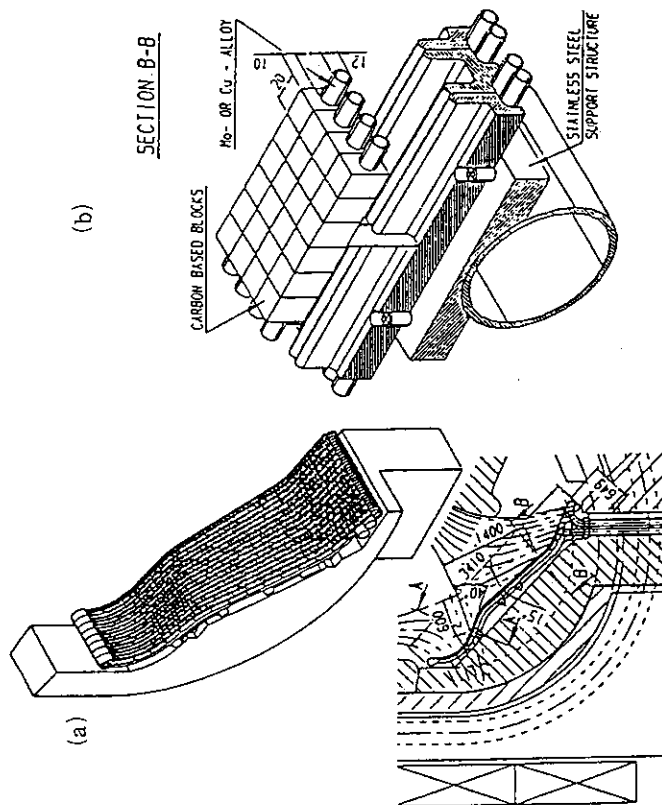


Fig. 2.1 Main divertor plate concepts

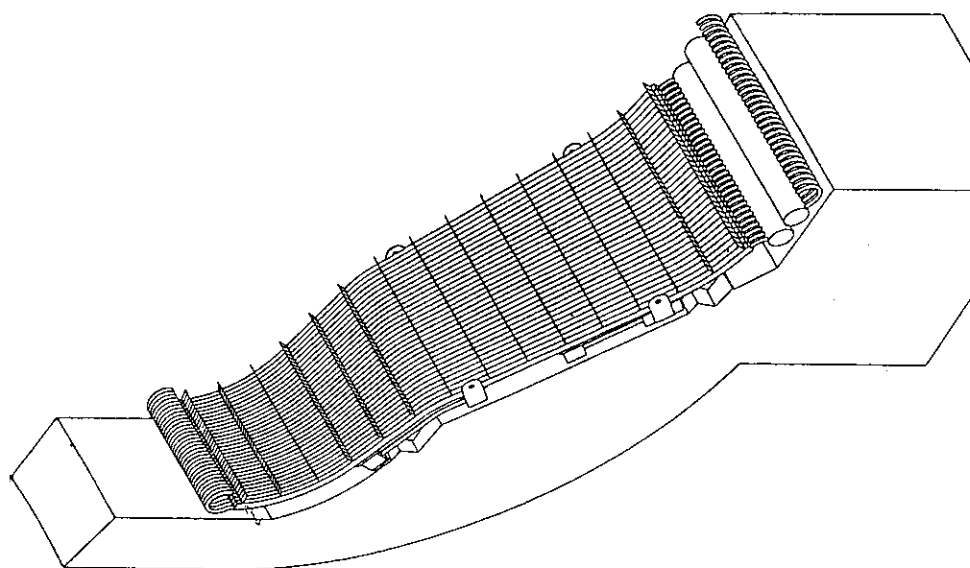


Fig. 2.4 Flexible attachments for divertor plate support (one tube per armor)

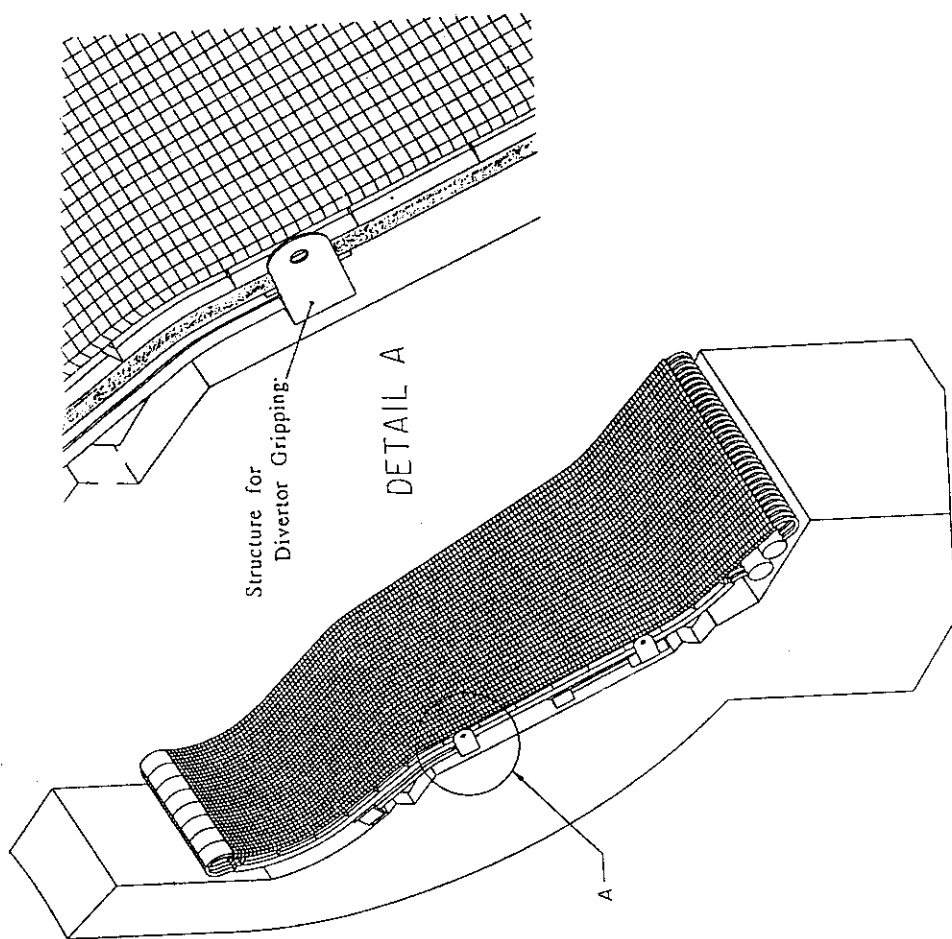


Fig. 2.3 Overall divertor configuration (one tube per armor)

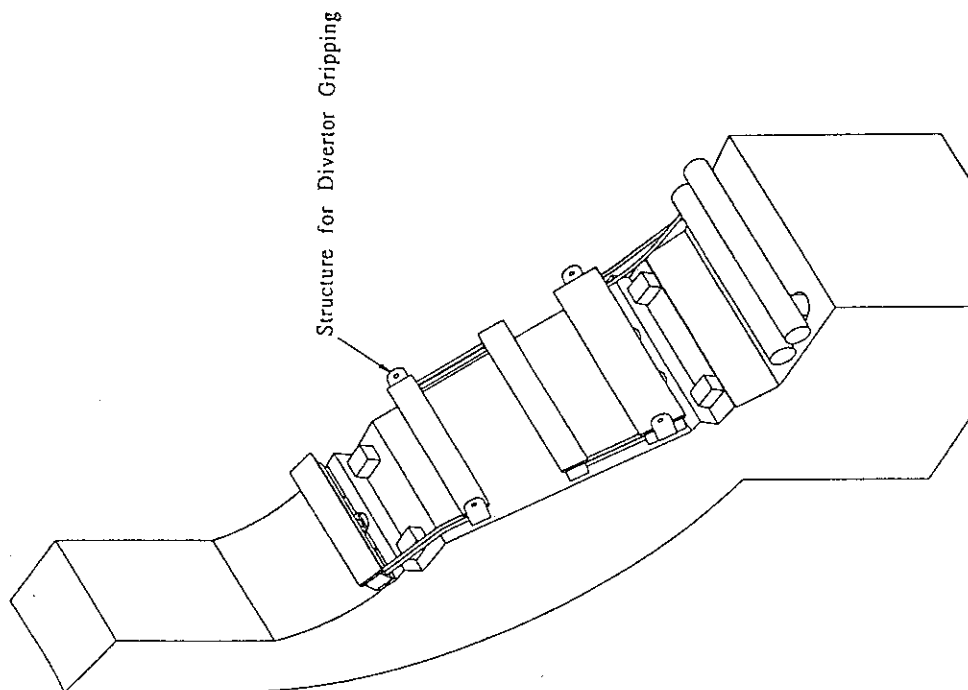


Fig. 2.5 Support beam and structure for divertor gripping

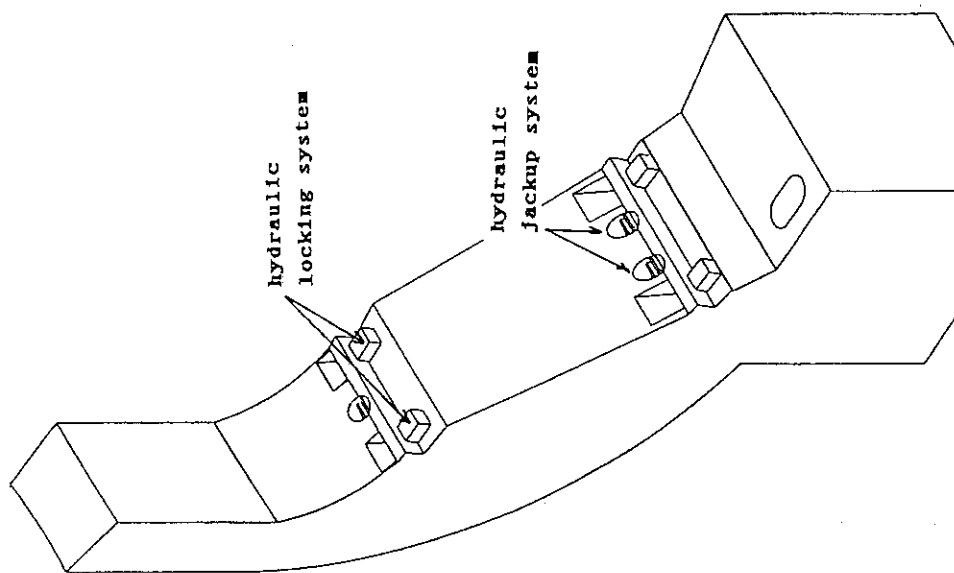


Fig. 2.6 Structures for divertor plate locking and jack-up

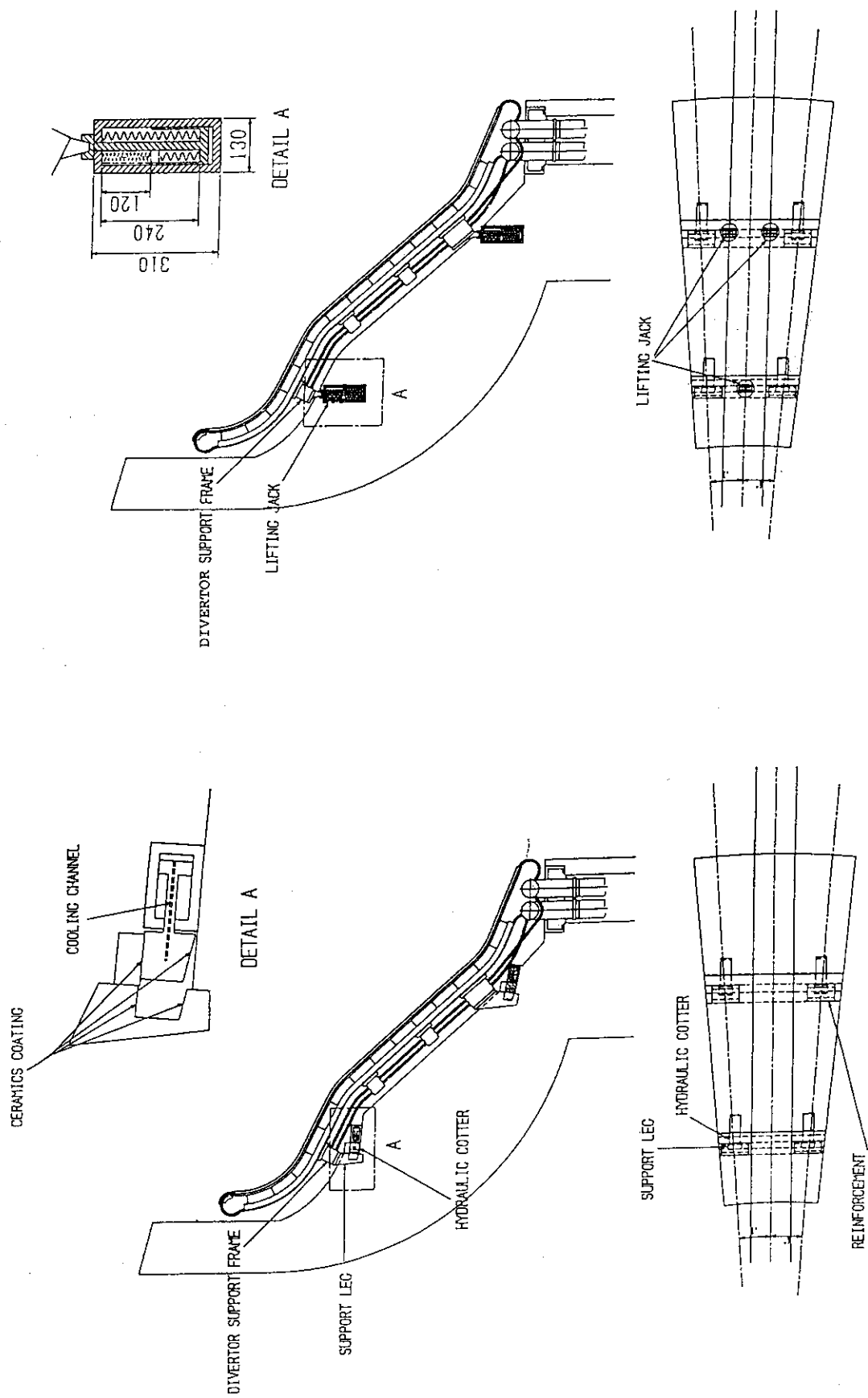


Fig. 2.8 Divertor jack-up system

Fig. 2.7 Divertor locking system

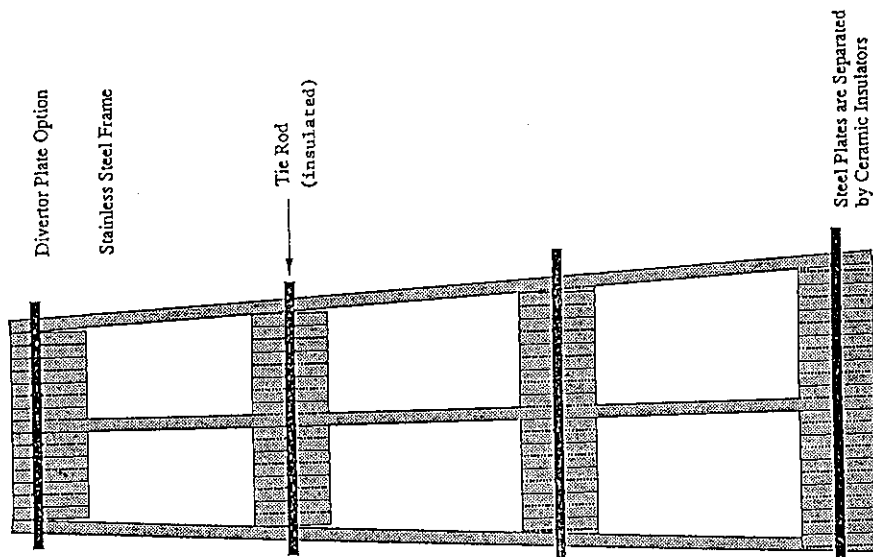


Fig. 2.9 Schematic diagram of steel support structure for divertor. Discontinuous support tends to reduce structural constraint. Coolant channels are intermittently insulated as required.

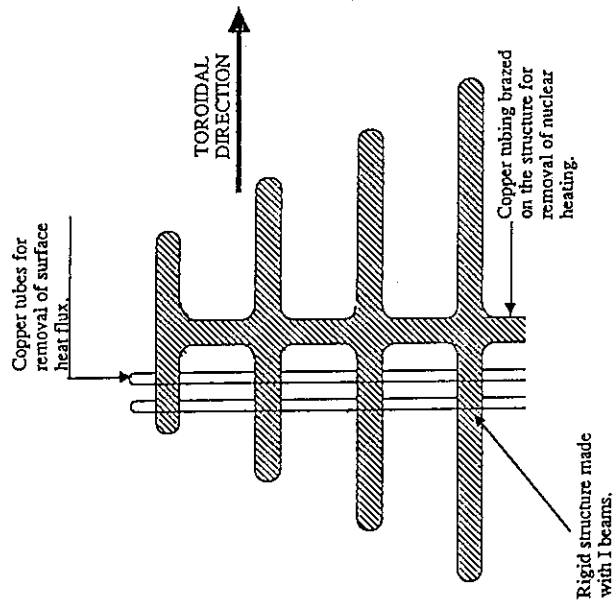
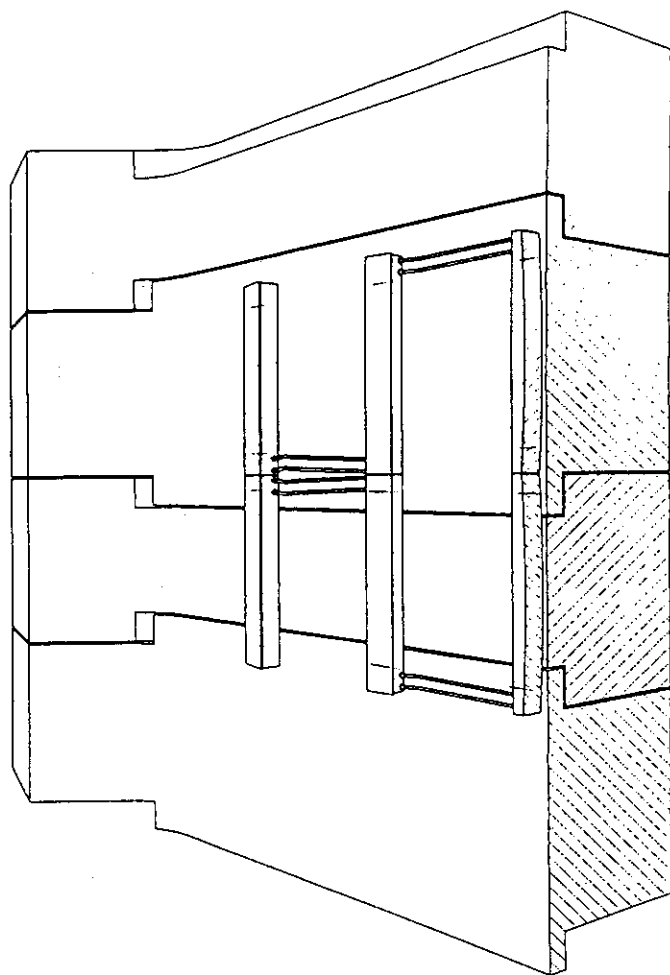


Fig. 2.10 Schematic of alternate steel support structure for divertor. Configuration avoids high EM forces if copper coolant tubes are isolated by insulated attachments.



A ... MISALIGNMENT OF TWO
SHIELD PLUGS FROM
SECTOR TO SECTOR.

B ... RESULTING STEP
BETWEEN TWO ADJACENT
DIVERTOR PLATES.
(~5 TO ~10 PERCENT
OF "A")

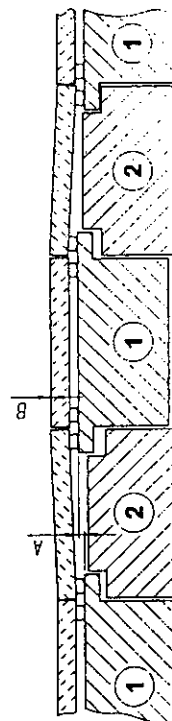


Fig. 2.11 Lower shield plug concept

3. 構造設計の特徴

3.1 設計課題

ダイバータ支持構造体を中心に、ITER CDAの設計から考えられる課題を挙げる。

- (1) ダイバータ支持構造体が機械強度的に耐え得るか
- (2) 電気絶縁対策は十分か
- (3) 遮蔽性能は確保できているか
- (4) ダイバータ交換用脱着機構はあるか
- (5) 冷却対策はとれているか

3.2 設計の特徴

3.1の設計課題を解決すべく次のダイバータ支持構造体を検討する。Fig. 3.1に、ダイバータ支持構造体を枠構造にしたダイバータ支持枠を示す。支持枠から4本の支持枠固定用の足を出す。ダイバータ板は長さ方向に3.4mになるので、ダイバータ板の重心部に、支持用の足を出す。

Fig. 3.2に、ダイバータ支持枠のロッキング及びジャッキアップ用水圧コッターの位置関係を示す。ロッキング用コッターは4個、ジャッキアップ用コッターは3個とする。ダイバータ支持枠を設置する遮蔽体表面は上記支持体が納まるように溝を掘っておいて、そこに入れる。これはダイバータ板脱着の際のガイドとしても使う。

このダイバータの全体構成をFig. 3.3に示す。ダイバータ板の冷却は、アーマー1つに対して1本の冷却管で冷却する。ダイバータ支持枠の冷却法をFig. 3.4に示す。ダイバータ支持体を枠構造にしたために、ディスラプション時に枠全体に流れるループを作る渦電流が発生する。これを防ぐために上記ループを切る構造にする必要がある。支持枠の冷却材は枠に仕切りを入れた所を流れる。支持枠の電気絶縁部でおりかえして、冷却材仕切板を境にして入ってきた所とは反対側を流れて支持枠の外へ流れる。

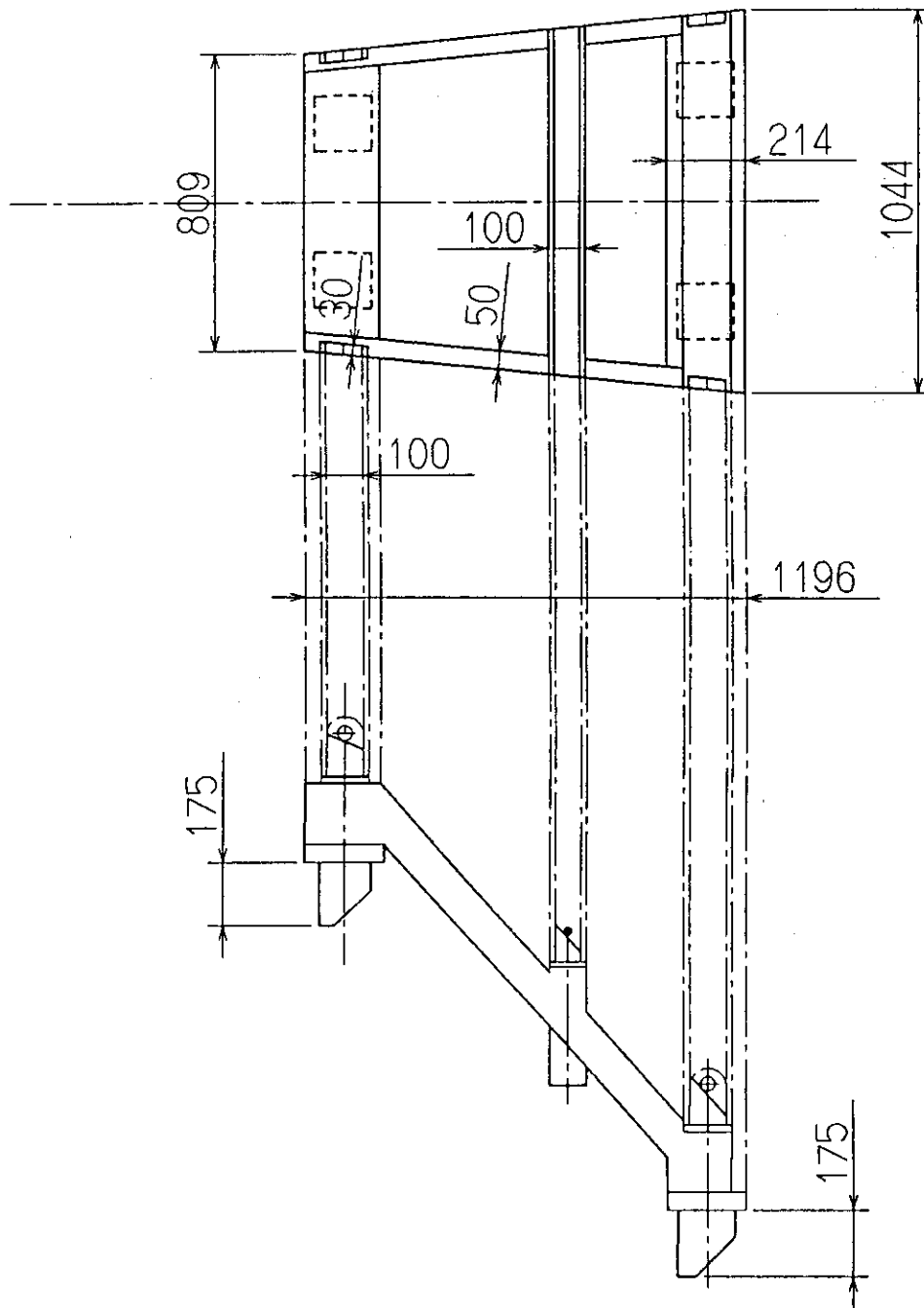


Fig. 3.1 Divertor support frame

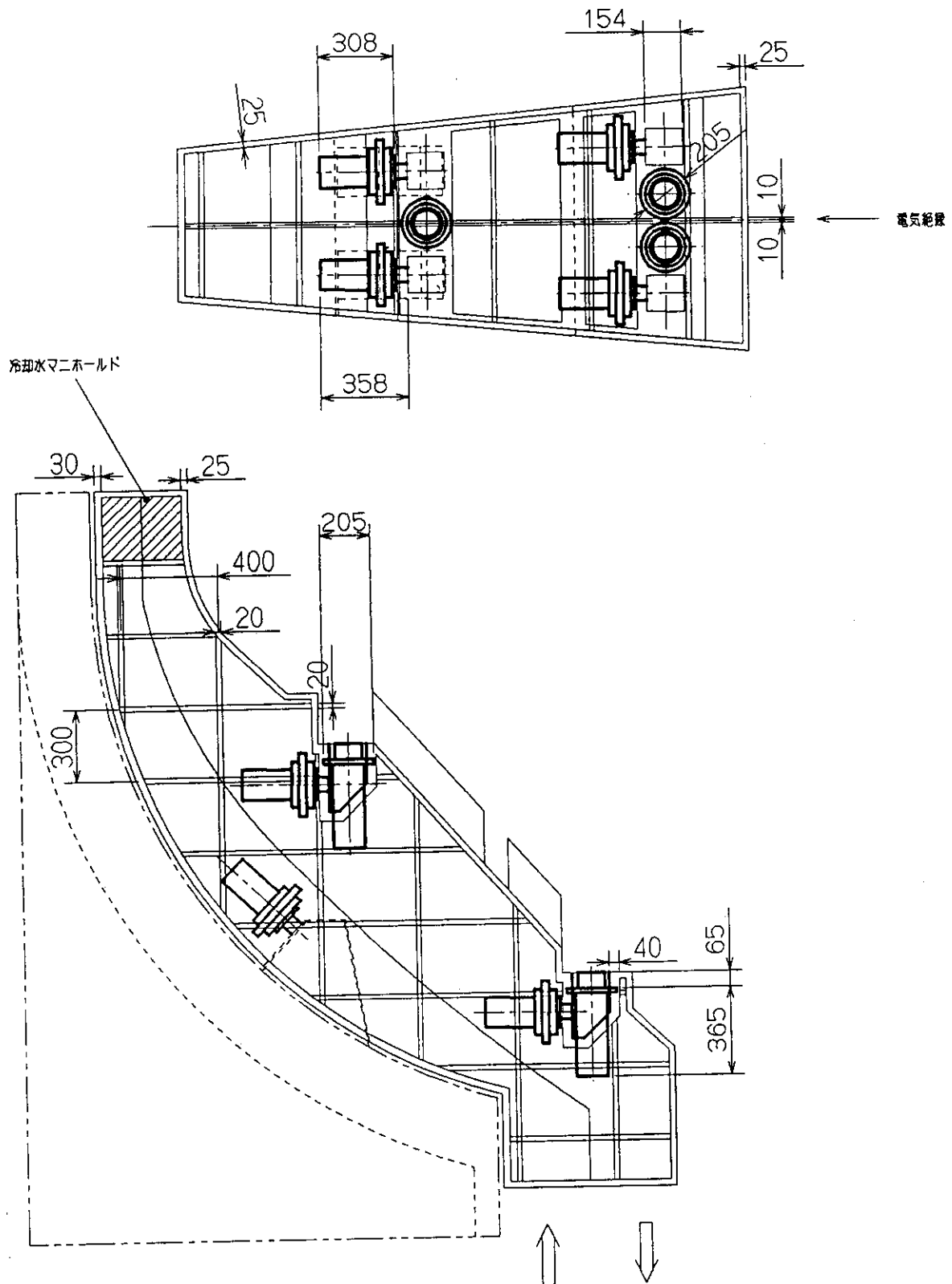


Fig. 3.2 Positions of locking cotters and jackup cotters for divertor support frame

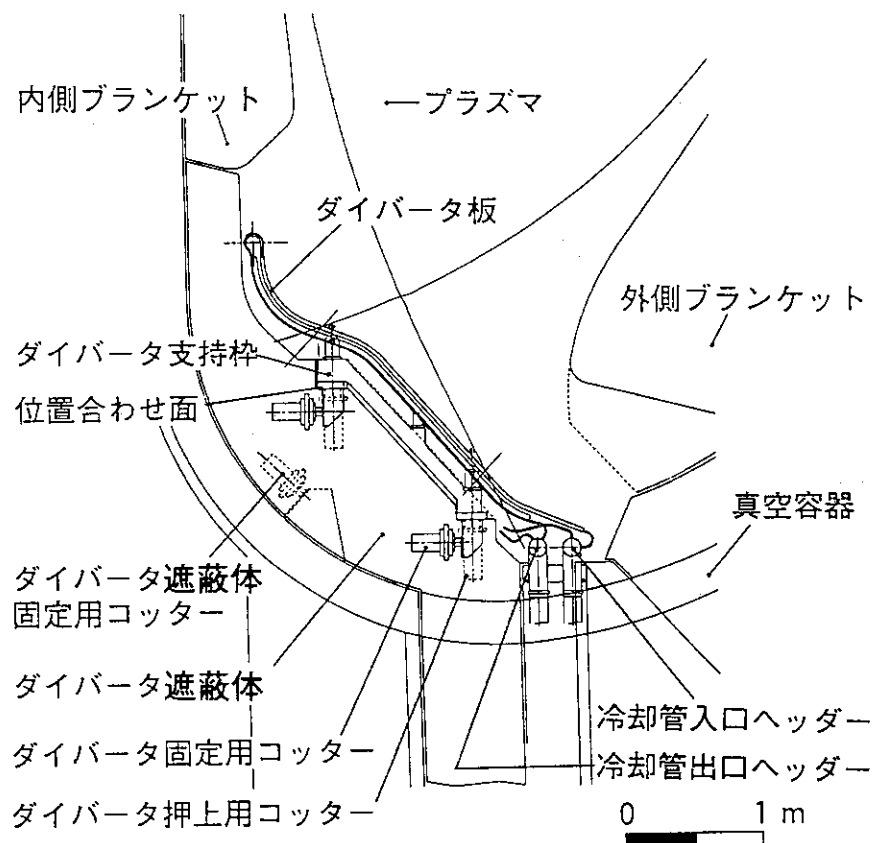


Fig. 3.3 Concept for divertor structure

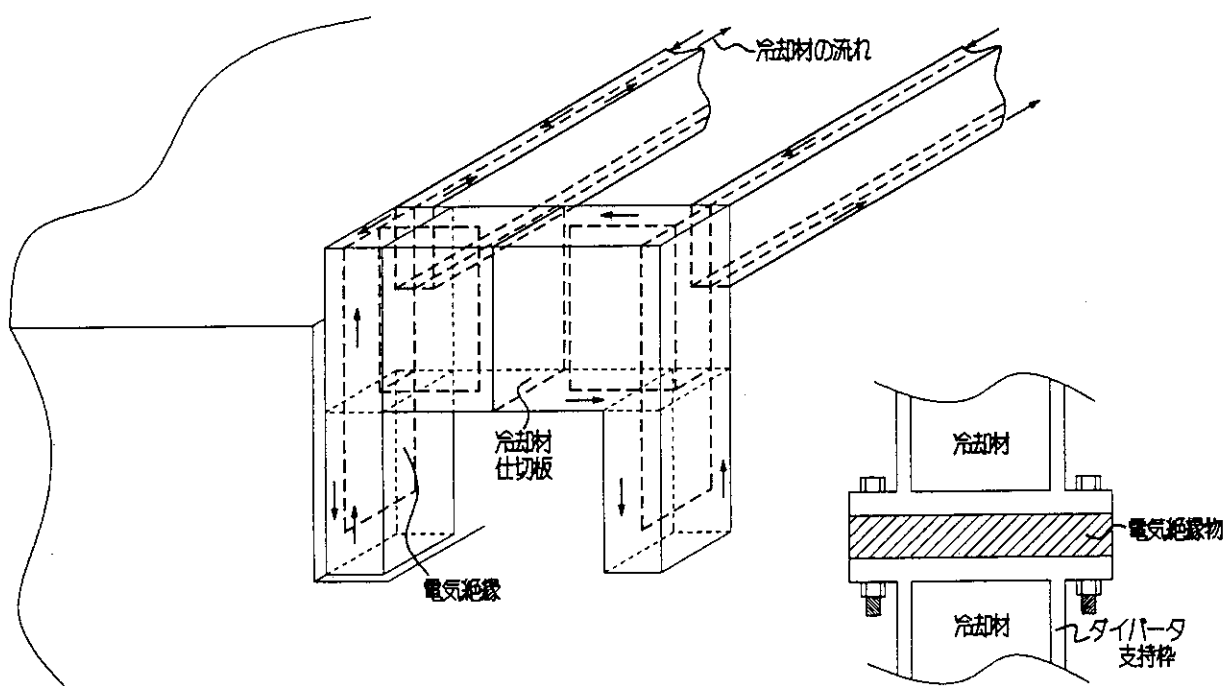


Fig. 3.4 Cooling method for divertor support frame

4. 各部構造設計

本章ではダイバータ各部の構造を示す。結果のみを示すのではなく設計に際して検討した内容も示すことにより、今後の判断材料を供するものとする。ダイバータは、ダイバータ板、ダイバータ支持棒及びそれらを設置する遮蔽体から成る。機構としては、熱延び吸収機構、ダイバータ脱着機構がある。下側ダイバータと上側ダイバータとは基本的には同じ構造であるが、相異点は明確にしておく必要がある。

4.1 ダイバータ支持棒

当初考えたダイバータ支持棒をFig. 4.1に示す。Fig. 4.1に示すように、ダイバータ支持棒には両端に2本ずつの足を付ける。ダイバータ支持棒中央付近2ヵ所にも足を付ける。ダイバータ支持棒の位置合わせは、Fig. 3.3に示す面合せ構造とする。ダイバータ支持棒は厚さ10mm、50mm×100mmのSUSで作るものとする。

(1) ダイバータ支持棒に働く電磁力

プラズマ電流停止率はディスラプション時が最も大きく、1 MA/msである。これに伴い上記支持棒に渦電流が発生し電磁力が支持棒にかかる。ここでは簡易計算でダイバータ支持棒に電気絶縁が必要であることを示す。詳細計算は5章で示す。

ダイバータ板付近のポロイダル磁場は $B_p \approx 2$ Tで、プラズマがディスラプションで20msの時定数で減衰すると仮定すると⁴⁾、ダイバータ支持棒には約40kAの電流が流れ、電磁力 5×10^5 Nが発生する。この時のダイバータ支持棒の長辺にかかる曲げ応力は $(2 \sim 3) \times 10^3$ MPaになる。SUSの最大引張応力は100℃で $\sigma_u = 500$ MPa、降伏応力は $\sigma_y = 220$ MPaで、SUSでは上記電磁力には耐えられない。電気絶縁をダイバータ支持棒のどこか1ヵ所にはさむと電磁力は 2.4×10^3 Nと、約200分の1に軽減され、電磁力に対しては耐えられることがわかる。

(2) ダイバータ板冷却管に働く電磁力

ダイバータ板の冷却管を中実矩形のモデルにして、(1)と同じディスラプション条件で、冷却管は何本まで束ねることができるかを調べる。Fig. 4.2にディスラプションで誘起される渦電流と中実矩形にした冷却管の幅(a)との関係を示す。中実矩形にした冷却管の板厚(b)は30mmの場合である。case 1は冷却管材をSUSで冷却チャンネルを32本に分割して、その内の20本を束ねた場合、case 2は冷却管材はCuで冷却チャンネルを32本に分割してその内の20本を束ねた場合、case 3は冷却管材はCuで冷却チャンネルを16本に分割し、それを60本束ねた場合である。

これを基に中実矩形にモデル化した冷却管の縁での電磁力をFig. 4.3に示す。中実矩形にモデル化した冷却管の厚さbをパラメータとして示す。支持点間距離L、幅方向端部での電磁圧力P

として、1/2 スパンに作用する電磁力 F_0 は

$$F_0 = \frac{1}{2} \cdot P \cdot L \quad \dots\dots\dots (4.1.1)$$

となつて、Fig. 4.4 のような幅方向の分布をもつ。

1/2 スパン分のモーメント T は

$$T = \int_0^{a/2} F_0 \cdot \frac{x}{a/2} \cdot x \cdot dx = \frac{1}{6} F_0 \cdot a^2 \quad \dots\dots\dots (4.1.2)$$

$$\text{支持部の反力 } N = \int_0^{a/2} 2 \cdot F_0 \cdot \frac{x}{a/2} \cdot dx = \frac{1}{2} \cdot F_0 \cdot a \quad \dots\dots\dots (4.1.3)$$

1 ↑
スパン分

振り応力 τ は

$$\tau = \frac{1}{k} \frac{T}{ab^2} = \frac{1}{12} \cdot \frac{P \cdot L \cdot a}{kb^2} \quad \dots\dots\dots (4.1.4)$$

支持ピンの剪断応力 τ_p はピンの外径 D として

$$\tau_p = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{P \cdot L \cdot a}{D^2} \quad \dots\dots\dots (4.1.5)$$

でそれぞれ表される。

例えば厚さ $b = 5 \text{ mm}$ 、支持点間距離 $L = 1 \text{ m}$ 、支持ピンの直径 $D = 8 \text{ mm}$ とした場合の冷却管に働くねじり応力をFig. 4.5 に示す。外径 18 mm 、内径 15 mm の銅の冷却管を用いる場合、厚さ $b = 5 \text{ mm}$ 、幅 $a = 18 \text{ mm}$ に相当するので、Fig. 4.5 に従うと 12 kg/mm^2 になる。銅の許容応力は $5 \text{ m} \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ であるので、冷却管は束ねることはできず、しかも、支持点間距離は1/3程度まで縮める必要があることがわかる。

(3) ダイバーク支持棒の冷却法

ディスラプション時に、ダイバーク支持棒にかかる電圧は 1 kV 程度である。また、上記電磁力を抑制するために、支持棒に例えばセラミック絶縁物を設置する。このために、支持棒に冷却管を通すと、冷却管を支持棒と電気絶縁するか、冷却管の1部を電気絶縁して大きなループができないようにする必要があり、構造が複雑になる。そこで、ダイバーク支持棒の冷却はFig. 3.4 に示すようにダイバーク支持棒の中に冷却水を直接流すことを考える。

ダイバーク支持棒は厚さ 10 mm のSUS で作るものとする。発熱率は $q''' = 10 \text{ MW/m}^3$ なので、ダイバーク支持棒全体の発熱量は $Q = 0.59 \text{ MW}$ である。冷却水チャンネルの入口温度を 50°C 、出口温度を 65°C とすると¹⁾、上記支持棒の冷却に必要な重量流量は $G = Q / (c_p \cdot \Delta T) = 9.3 \text{ kg/s}$ となる。ここで、 ΔT は冷却チャンネル出入口温度差、 c_p は水の比熱である。水の比重 ρ を用いて、重量流量から体積流量を求めると、 $W = 0.0093 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。上記棒内の流路断面積から水

の流速を求めると、 $v = 3.9 \text{ m/s}$ となる。これは、流速を 5 m/s 以下にするという設計条件に合致する。

次に上記棒の温度を求める。SUSの熱伝導率は $\lambda = 15 \text{ W/mK}$ であるので、上記フレーム外側表面と内側表面の温度差は

$$\Delta T_s = \frac{q''' t^2}{2\lambda} = 67^\circ\text{C}$$

となる。 t は支持棒の肉厚である。

また、熱伝導率を $\alpha = 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした時の膜温度差は

$$\Delta T_f = \frac{q''' t}{\alpha} = 10^\circ\text{C}$$

となる。従って、Fig. 4. 6 に示すようにダイバータ支持棒表面の温度は 142°C となる。これはSUSの許容温度 ($\sim 400^\circ\text{C}$) 以下なので、温度条件的に設計は成立する。

次にダイバータ支持棒側板の曲げ応力を求める。ダイバータ支持棒は長さ 1.3 m 、幅 0.1 m (Fig. 4. 6 参照) で、冷却水の内圧は 3.5 MPa である。Fig. 4. 6 中点 A に加わる最大曲げ応力は $\sigma_{max} = 175 \text{ MPa}$ である。SUSの降伏応力は $\sigma_y = 220 \text{ MPa}$ 、最大引張応力は $\sigma_u = 500 \text{ MPa}$ であり、応力強さ S_m は $S_m = \min(\frac{1}{3} \sigma_u, \frac{2}{3} \sigma_y) = 146 \text{ MPa}$ である。設計基準は $\sigma_{max} < 1.5 S_m$ であり、上記値はこれを満足するので、機械強度的観点からも、上記ダイバータ支持棒の設計は成立する。

(4) ダイバータ板及びダイバータ支持棒の重心

ダイバータの交換の際、把持する場所を固定するために、また、ダイバータ支持棒の支持点をどこにするかを定めるために、重心を求めた。重心はFig. 4. 7 に示すダイバータ支持棒とFig. 4. 8 に示すアーマ構造とを用いて求めた。Table 4. 1 にその結果を示す。総重量は 1219 kg で、重心位置はダイバータを設置した位置でポロイダル断面上で $(x, z) = (4817.0, -5636.2)$ である。

(5) ダイバータ脱着用フック

Fig. 4. 9 にダイバータ脱着用フックを示す。上記の結果を踏まえて、ダイバータ板とダイバータ支持棒の重量は $1.5 \times 10^3 \text{ kg}$ であるとして、全重量がダイバータ支持棒足 1 本 (外寸 $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 厚さ 10 mm のSUSで構成) にかかる場合について、曲げ応力を計算すると、 $\sigma = 1.5 \sim 2.2 \text{ MPa}$ であり、上記の σ_u 、 σ_y より十分小さく、たわみも $v = 0.004 \text{ mm}$ で、機械強度的には本設計で十分耐える。

上記フックは厚さ 10 mm 、高さ 70 mm のSUSかTZM (モリブデン合金) で作ることを考える。引張応力的には、ダイバータ全体の $1.5 \times 10^3 \text{ kg}$ の重量が 1 個のフックにかかっても、フックはSUS, TZM のどちらかで作っても耐える。

フック上部と下部の温度差を ΔT とする。核発熱 10 MW/m^2 が入ってくると、

$$\Delta T = \begin{cases} 1630^\circ\text{C} & (\text{SUS}) \\ 245^\circ\text{C} & (\text{TZM}) \end{cases}$$

となり、SUS でフックを作る場合には何らかの冷却を考える必要がある。水圧コッターで上記支持棒をジャッキアップして、ダイバータ交換用アームをダイバータ交換用フックに引っかけて、ダイバータ遮蔽体から支持棒を取りはずす。ジャッキアップのストロークは15cmを考えている。従って、ダイバータ交換用フックは、支持棒をダイバータ遮蔽体に装着した状態では、ダイバータタイルの裏側（プラズマとは反対側）にかくれるように設置する。Fig. 4.9 はそれを示す。これにより、上記フックへの熱負荷集中はなくなる。

4.2 ダイバータ遮蔽体

ダイバータ遮蔽体としての遮蔽性能を保持するために、Fig. 3.2 に示すように、ダイバータ支持棒を納めるガイドの部分をふくらませて、実効的にダイバータ遮蔽体の厚さを大きくした。また、中性子遮蔽の観点から、Fig. 4.10 に示す冷却配管とそれを納めているポートとの空間を通ってくる中性子ストリーミングを低減する必要性があることがわかった⁵⁾。この対策として、上記冷却配管の管径を途中で大きくすることにより、炉本体外側から、上記空間を通してプラズマが直視できないように設計しなおした。

このため、Fig. 4.10 に示す冷却配管位置が径方向外側へ寄る。Fig. 4.10 では、異動の長さを示すために、冷却配管のみを動かした図にしてある。このため、Fig. 4.10 に示すダイバータ冷却管が、ダイバータ交換時に、ブランケットセンタモジュールやブランケットサイドモジュールに接触する可能性が出て来た。

また分解修理時のダイバータ板の位置決め精度が $\pm 20\text{mm}$ 必要なことから、ダイバータ板の沿直方向になっている部分がとなりのダイバータ板と接触する可能性がある。そこでダイバータをFig. 4.10 に示すような沿直方向への出し入れではなく、Fig. 4.11 に示す遮蔽体の表面に垂直方向への出し入れに変更し、また、ダイバータプラズマの特質を害しない範囲でブランケットの1部を削ることにした。

4.3 ダイバータ脱着機構

1年に1回以上の交換頻度を想定しているダイバータの脱着には水圧コッターを用いる。Fig. 4.11 に、水圧コッターの設置位置を示す。水圧コッターにはダイバータ板をビーグルで把持できるところまで持ち上げる、あるいはダイバータ支持棒についている足をダイバータ遮蔽体内に引き込むダイバータ押上用コッターと、ダイバータをダイバータ遮蔽体に固定するダイバータ固定用コッターがある。

コッターの作動には水圧を用いる。ダイバータ固定用コッターは4個で、ダイバータ押上用コッターは3個である。ダイバータ表面の設置位置精度は0.1mm 程度であるので、その精度を出すために、位置合わせ面を設けてある。上記コッターの仕様等については6章で詳述する。

4.4 上側ダイバータ構造

これまで、下側ダイバータの支持棒を含むダイバータ構造を検討して来た。基本的には、上側ダイバータと下側ダイバータとで違いはない。違いは次の2点である。

- (1) 動力の向きが逆であるから、ダイバータの脱着法が異なる。
- (2) 上側のダイバータ遮蔽体には、下側のダイバータ遮蔽体にはない第一壁、ブランケットの冷却系があり、水圧コッターの設置空間が少ない。

Fig. 4.12に、上側ダイバータの構造概念を示す。ダイバータ遮蔽体からのダイバータの脱着は引掛けフックで行う。現状の技術では分解修理用ビーグル把持部の位置決め精度は $\pm 20\text{mm}$ である。精度の向上自身開発テーマであるが現時点においてこれを容認すると、分解修理用ビーグルのみでは、位置決め精度の観点からフックをダイバータ支持棒のフック受け口に挿入することはできない。しかも、フックに引掛けるにはx, yの2方向の動作が必要である。そこで、まず、Fig. 4.12に示すように、ダイバータ支持棒をダイバータ支持棒とかみ合う遮蔽体にかみ合わせ、ダイバータ支持棒の位置を決める。次に、ダイバータ支持棒を-x方向に移動して、フックをフック受け口に挿入する。その後、水圧コッターでダイバータ支持棒をy方向へ引っ張り上げていく。Fig. 4.13は上側ダイバータがダイバータ遮蔽体に納まった状態を示す。

4.5 冷却管ヘッダ周りの構造

4.5.1 検討条件

前記したように、ITER CDAでは32個のモジュール (11.25°) 構成のダイバータ板が提案されている。各モジュールは32本の冷却管から構成されており、冷却管群の流路構成は各冷却管に対して均等な圧力差を得易い反流形である。このようなダイバータ板の構成における冷却水条件を Table 4.2に示す。

Table 4.2は、 $15\text{MW}/\text{m}^2$ の“伝熱面熱負荷”に対して ~ 3 倍のバーンアウト裕度を設定した場合の冷却水条件であり、ダイバータ板に入る表面熱負荷に対して設定されたものではない。

ダイバータ板が片側表面熱負荷を受けると、断面内の温度勾配によりダイバータ板はプラズマ側へ変形しようとする。このような面外変形はダイバータ運転上望ましくないため、CDAでは冷却管の軸方向への変形抵抗が小さい板バネで面外変形を拘束するダイバータ支持構造が提案されている (Fig. 2.1(b))。このような板バネ支持構造を採用すると、ダイバータ板冷却管はその軸方向へ選択的に変形することが期待される。CDAではこの熱延びによって冷却管に発生する熱応力を緩和するため、冷却管とヘッダの接続部近傍に半径約60mmの 180° ベンド部を設けている (Fig. 4.14)。

ここでは、Table 4.2の冷却水条件を前提とし、冷却管の軸方向の熱延び量はFig. 4.14のベンド部の構成で吸収できる程度のものとしてCDAで提案されている冷却管ヘッダ回りの構造を改善する。

4.5.2 CDA構造の改善

ITERのダイバータ板構造としては次の項目を満足する構造のものが望まれる。

- (a) 特別な流調を施すことなく約10m/sの冷却水を32本の冷却管に均等に流せる。
- (b) 高圧力(約35atm)仕様の冷却管/ヘッダ溶接, 非破壊検査ができる。
- (c) 冷却管の熱伸びが吸収できる。
- (d) 遠隔操作機器との整合が採れる。

Table 4.2の冷却水条件では, 32本の冷却管に $5.65 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (Physics Phase)の冷却水を供給する必要がある。CDAでは内径100mmのヘッダと内径80mmの接続配管が提案されているが, この場合, ヘッダ入り口の平均流速 V_{in} は7.2 m/s, 接続配管内の流速 V_p は11.25 m/sとなる。冷却管内の流速は $v = 10 \text{ m/s}$ であるから流速比 $v/V_{in} = 1.4$ となる。等分配を考えた場合の分配管の特性パラメータ k_d は,

$$k_d = \lambda L / 3D - 1$$

(λ , D , L : 主管の管摩擦係数, 相当直径, 長さ)

で表され, CDAのヘッダ構成では $k_d = -0.957$ となる。したがって, 各冷却管に絞りを設けてヘッダ単位長さ当たりの分配流量が一定となるように調整した場合には, ヘッダ入口と端末との圧力差は -0.25 atm となり, 圧力の最低値がヘッダの中に現れることはない。これは, 等分配を仮定した場合の結果であるから, 実際に等分配を実現する工夫が必要である。

今, q をヘッダ単位長さ当たりの分配・集合流量とすると, 分配側ヘッダにおいて,

$$dV_D/dx = -q/A \quad \dots\dots\dots (4.5.1a)$$

$$(1/\rho)dP_D/dx = -d(V_D^2/2) - \lambda V_D^2/2D \quad \dots\dots\dots (4.5.1b)$$

また, 集合側ヘッダにおいては,

$$dV_C/dx = -q/A \quad \dots\dots\dots (4.5.1c)$$

$$(1/\rho)dP_C/dx = -(2-\alpha)d(V_C^2/2) + \lambda V_C^2/2D \quad \dots\dots\dots (4.5.1d)$$

ここに, V : 流速, P : 圧力, λ : 管摩擦係数, α : 速度比, D : 主管径, ρ : 密度, x : 主管軸方向座標 ($0 \leq x \leq L$)。添字Dは分配側ヘッダ, Cは集合側ヘッダである。

ダイバータ冷却管の断面積を a とし, その流量 q を

$$q = aC(2(P_D - P_C)/\rho)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4.5.2)$$

で考える。ここに, C : コンダクタンス。 C を流速の関数として定義すれば非線形連立微分方程式 (4.5.1) を解くことができる。CDAのパラメータでは,

$$L = 1.17 \text{ m}, \quad V_D(x=0) = 7.2 \text{ m/s}, \quad P_D(x=0) = 3.5 \text{ MPa}, \quad a = 1.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

であり, 支管(スワール管)の圧損は0.92MPa であるから, 式(4.5.1)から得られる支管流速は

10.0m/s ($x=0$ 付近) $\sim$ 9.95m/s ($x=L$ 付近) となり、一定にはならない。式 (4.5.1) は連続分配・集合近似であるため、実際のディスクリートな分配・集合の場合には更に大きな流速差が生じることが予想される。このため、ヘッダの内径を大きくし、流速比 v/V_{in} を大きくする事が望まれる。実際、200 A-Sch. 40の配管を用いると (内径199.9mm)、式 (4.5.1) から計算されるヘッダ内の圧力と各冷却管の分配流量はほとんど同じになる。

次に、ダイバータ板冷却管とヘッダの溶接方法を考える。Fig. 4.14の構造では、接続配管付きのヘッダを冷却管側へ動かして位置決めし、その後で冷却管側から冷却管をヘッダに溶接する方法が想定される。ところが、チドリ配管の隣接配管間の最小ギャップは約30mmと小さいためこの溶接は容易でないばかりでなく、非破壊検査も容易ではない。そこで、空間的な制約や、高圧力使用を考えると、冷却管のヘッダへの溶接はヘッダの内側から実施し、冷却管側からは補強溶接を行うと言ういわゆる真空仕様の溶接方法が適切である。このためにはヘッダは半割のパイプになるが、非破壊検査も非常に信頼高くなる。

遠隔機器で接続配管と主配管 (炉外へ導かれる配管) とはレーザーで配管の内側から溶接する方法が検討されている。この様な溶接方法では、ダイバータ支持構造体を固定すれば接続配管の接続部の位置が自動的に決まるような構造が要求される。この意味で接続配管とダイバータ支持構造体とは一体構造にすること、支持構造体の剛性を高めることが望まれる。

最後に、熱延び対策であるが、これには、ベローズを用いる方法とCDAのようにベンドのたわみを利用する方法が考えられる。しかし、3.5MPaの高圧使用であることを考えるとベンドの適用の方が信頼性が高い。今、Fig. 4.15に示す幾何形状のベンドを考える。

図において、荷重点の荷重 F 方向の変形量 δ はCastigliano の定理を用いて求めることができる。結果を示すと、

$$\delta = Ff_1 \quad \dots\dots\dots (4.5.3)$$

$$f_1 = (R/EA) \{ (\pi/2 - \alpha)(1 + 3/2\kappa) - (2/\kappa)\cos\alpha + (1/4\kappa)\sin 2\alpha \} + (L/EA)\sin^2\alpha \\ + (L^3/EI) \{ (R/L)^2(1 - \sin\alpha) + (R/L)\cos\alpha(1 - \sin\alpha) + (1/3)\cos^2\alpha \}$$

支持点の曲げモーメント M は、

$$M = Ff_2 \quad \dots\dots\dots (4.5.4)$$

$$f_2 = R(1 - \sin\alpha) + L\cos\alpha$$

今、許容変形量を S_m 基準の曲げ応力で制限できるものとする、

$$\delta_{all} = (Zf_1/f_2)(1.5S_m) \quad \dots\dots\dots (4.5.5)$$

ここに、 Z : 冷却管の断面係数、 κ : 曲がりはりの断面係数であり、円筒断面形状では次式で与えられる。

$$\kappa = (1/(r_2^2 - r_1^2)) \left[r_2^2 \left\{ (1/4)(r_2/\rho)^2 + (1/8)(r_2/\rho)^4 \dots\dots \right\} \right. \\ \left. - r_1^2 \left\{ (1/4)(r_1/\rho)^2 + (1/8)(r_1/\rho)^4 \dots\dots \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4.5.6)$$

ここに、 r_2 : 円筒の外半径、 r_1 : 内半径、 ρ : 曲がりはりの曲率半径。

種々の幾何形状に関する解析結果をFig. 4.16示す。図から明かなように、許容変形量を大きくするには曲率半径を大きくすることによりベンド角度を大きくした方が効率的である。そこで、ここでは、 180° ベンドを考える。

以上述べたことを図面化したものをFig. 4.17-4.19に示す。

Fig. 4.17は改善したヘッダ回りの横断面図である。高圧力使用なので、冷却管はヘッダへ差し込み、ヘッダの内側からシール溶接することを考えた。更に、200A-Sch40のヘッダの肉厚は8.2mmであり、冷却管の直径18mmより小さいため、冷却管の溶接部には10mmの補強板を設けた。分配側のヘッダ部を例にした製作手順をFig. 4.20に示す。分解側ヘッダは、2個の半割パイプ(220degと140degのセグメント)からなり、最終組立はこれら半割部分の溶接である。この溶接によってダイバータ板の整列が乱れないようにするための治具の設計と溶接方法に関しては今後のR&Dの課題としたい。

Fig. 4.18は改善後のダイバータ全体構成であり、Fig. 4.19はCDAのダイバータ板形状と改善後のそれを比較したものである。図中の破線はCDAの構成であるが、受熱表面の位置には変更を加えていない。CDAのダイバータ板形状に比べてダイバータ板が長くなっているが、これは、接続配管の位置を垂直ポートにおける配管の配置計画から決めたためである。

Fig. 4.18にはダイバータ板の断面構成も図示した。内側ストライキング・ポイント(SP)の位置でのアーマタイルの幅は約24.2mm(ただし、隣接アーマ間ギャップを1mmとした)、外側SPの位置でのタイル幅は約31.5mmである。Fig. 4.21は伝熱面熱流束のタイル幅依存性を示したものである。この図から、外側SPの位置での最大熱流束は約 21.6MW/m^2 となり、表面熱流束(15MW/m^2)の1.44倍となる。

Table 4.1 Weights of one module divertor

項目 パーツ	体 積 (m^3)	材 料	密 度 (kg/m^3)	重 量 (kg)
アーマー	7.39×10^{-2}	カーボン	1.7×10^3	125.6
冷却管	1.70×10^{-2}	銅	8.9×10^3	150.9
戻り冷却管支持	8.94×10^{-2}	SUS	7.9×10^3	706.5
ダイバータ支持棒	2.99×10^{-2}	SUS	7.9×10^3	236.0
合計				121.90

Table 4.2 Divertor thermo-hydraulic parameters

Parameters	Physics Phase	Technology Phase
Flow Velocity at O.S.P [m/s]	10	15
Inlet Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	50	50
Divertor Temperature Rise [$^{\circ}\text{C}$]	10.4	14.4
Inlet Pressure [MPa]	3.5	2.0
Pressure Drop [MPa]	0.92	0.89
Channel Dimensions at O.S.P [mm]	15(ID)	15x5
Flow Enhancement	Twisted Tape	Internal Ramps
Peak Heat Flux [MW/m^2]	15	15

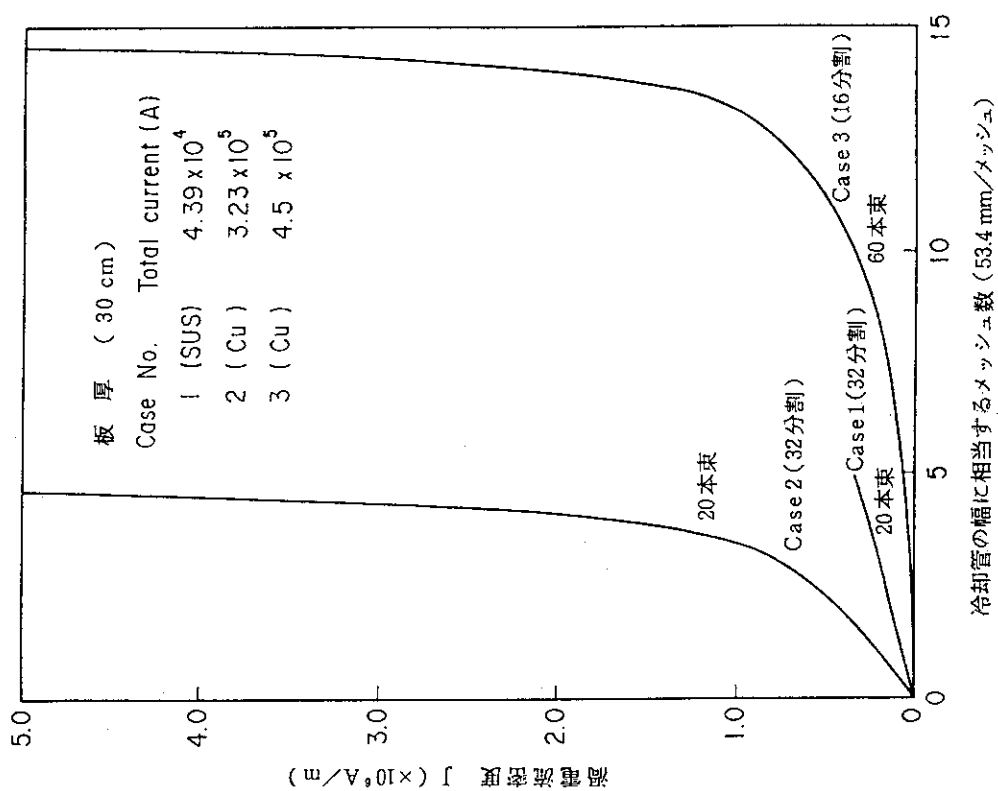


Fig. 4.2 Relations of induced eddy current and width of rectangular cross-section modeled for coolant tube

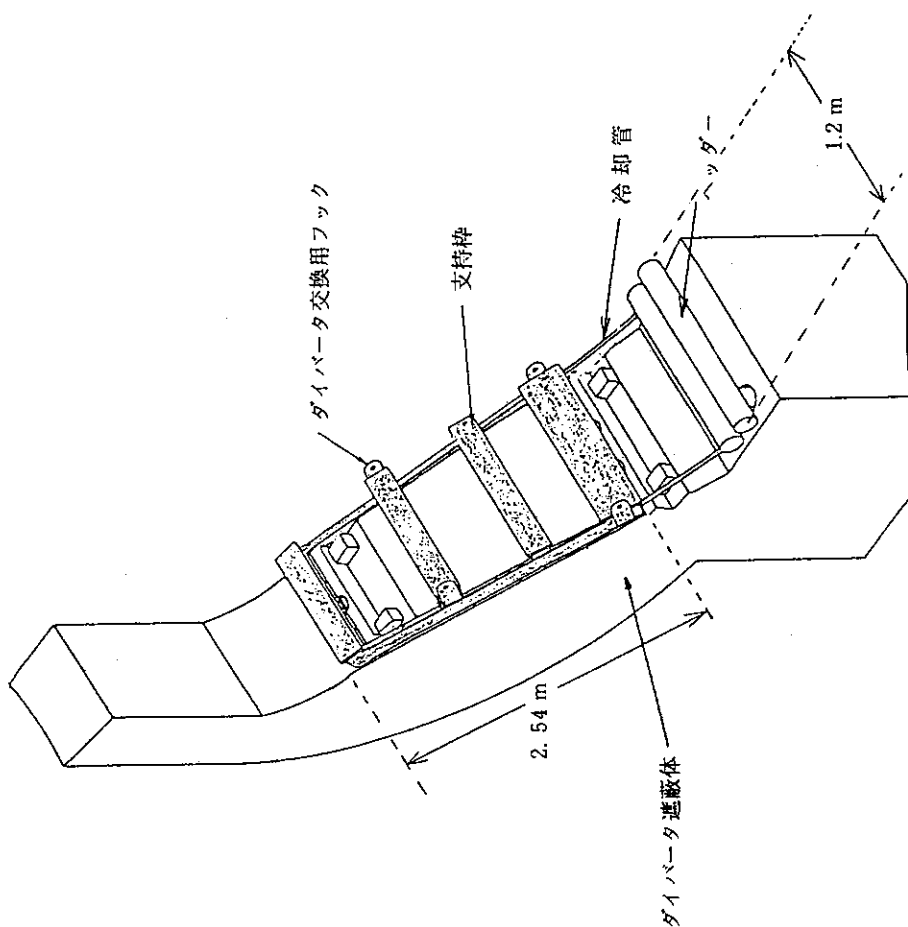


Fig. 4.1 Divertor support frame

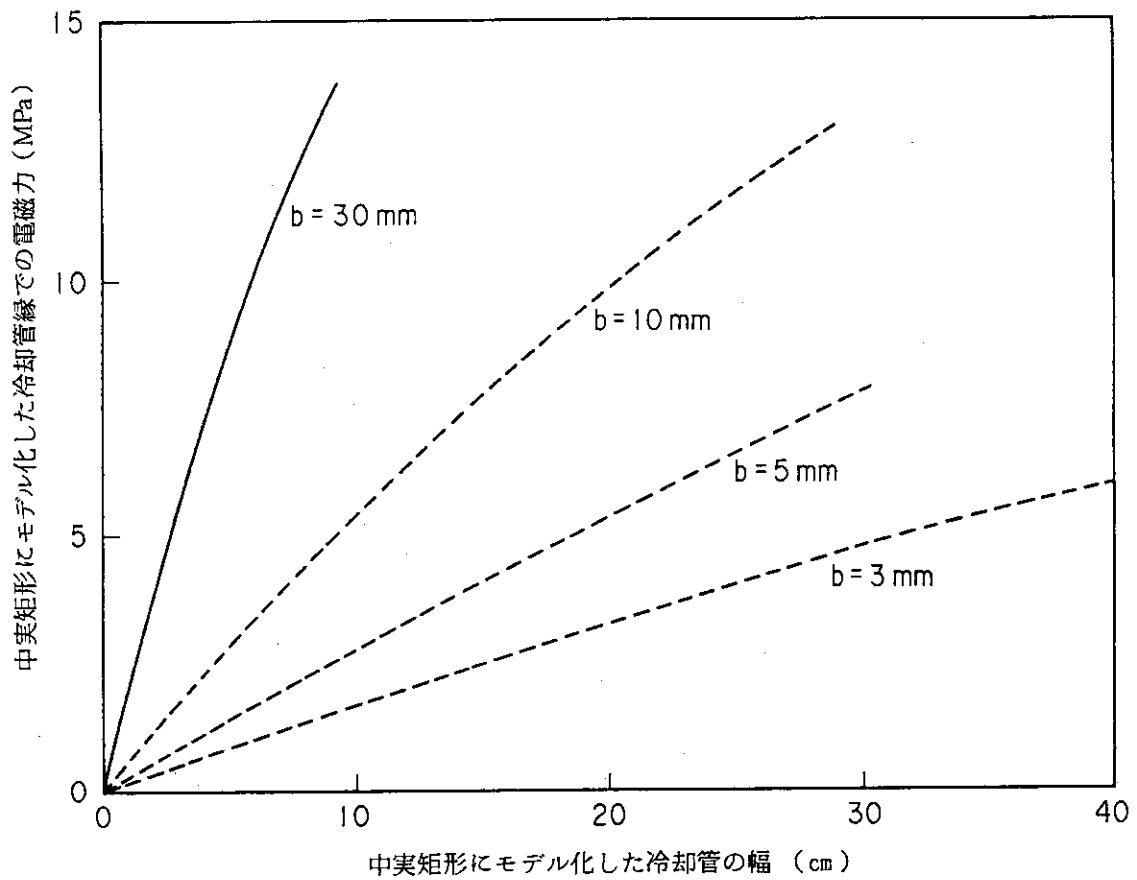


Fig. 4.3 Electromagnetic force at the edge of coolant tube in rectangular cross-section. b means the thickness of rectangular cross-section modeled for coolant tube.

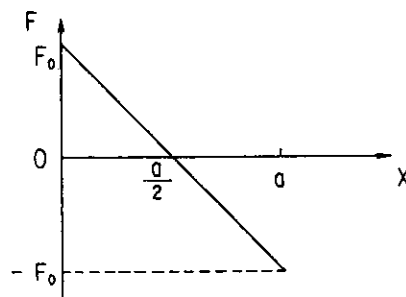


Fig. 4.4 Distribution of electromagnetic pressure in the width direction

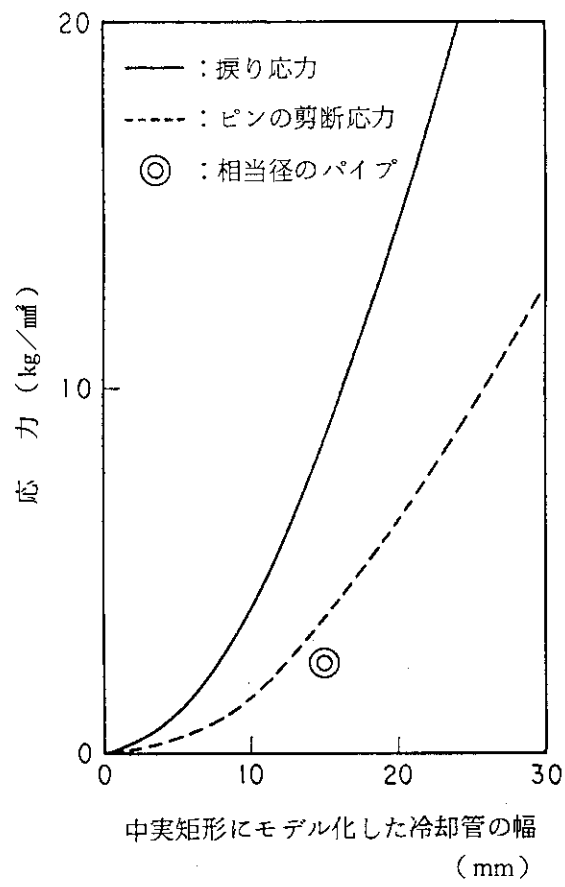


Fig. 4.5 Torsion in coolant tube

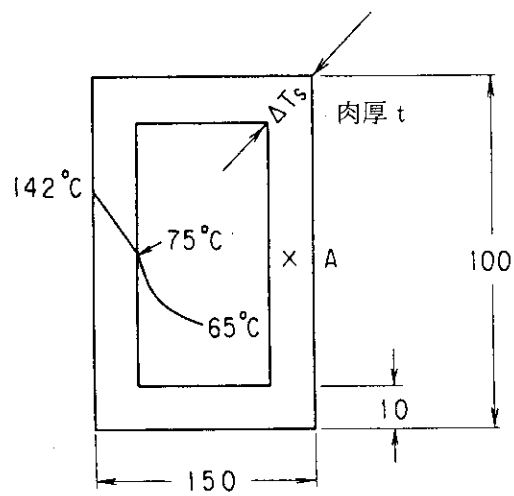


Fig. 4.6 Cross section of divertor support frame (unit: m)

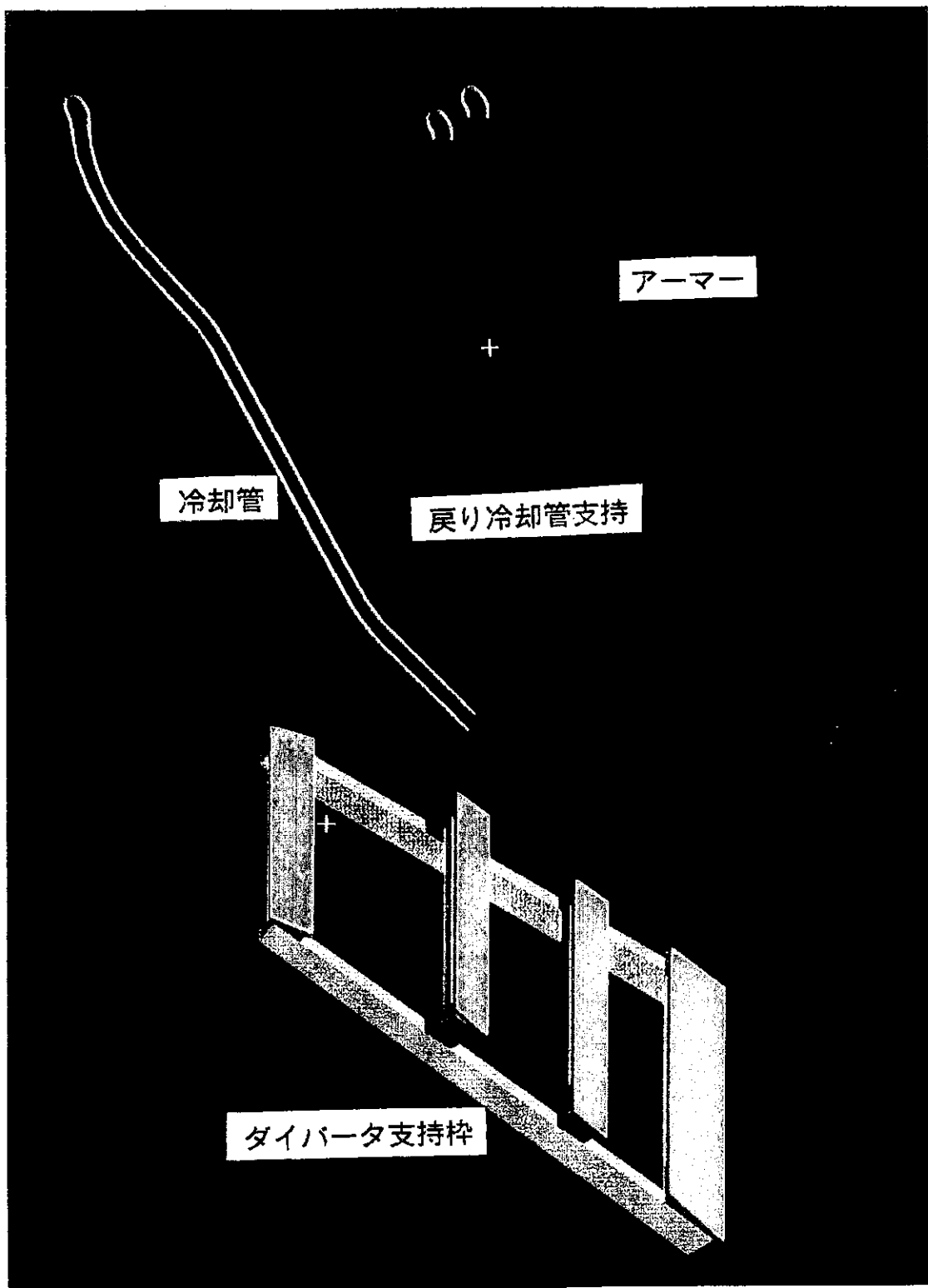


Fig. 4.7 Divertor model for calculation of the center of gravity

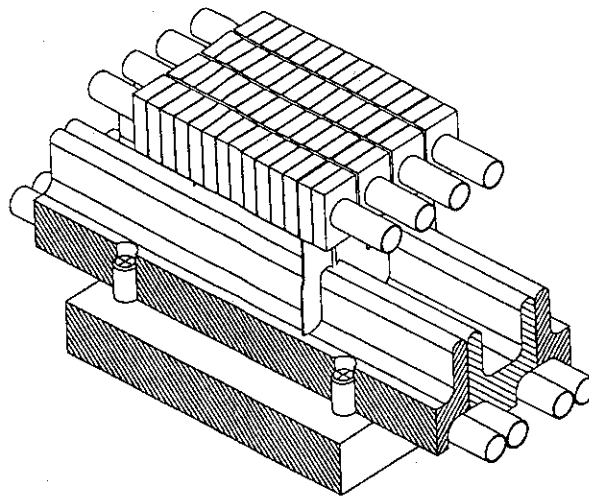


Fig. 4.8 Divertor concept

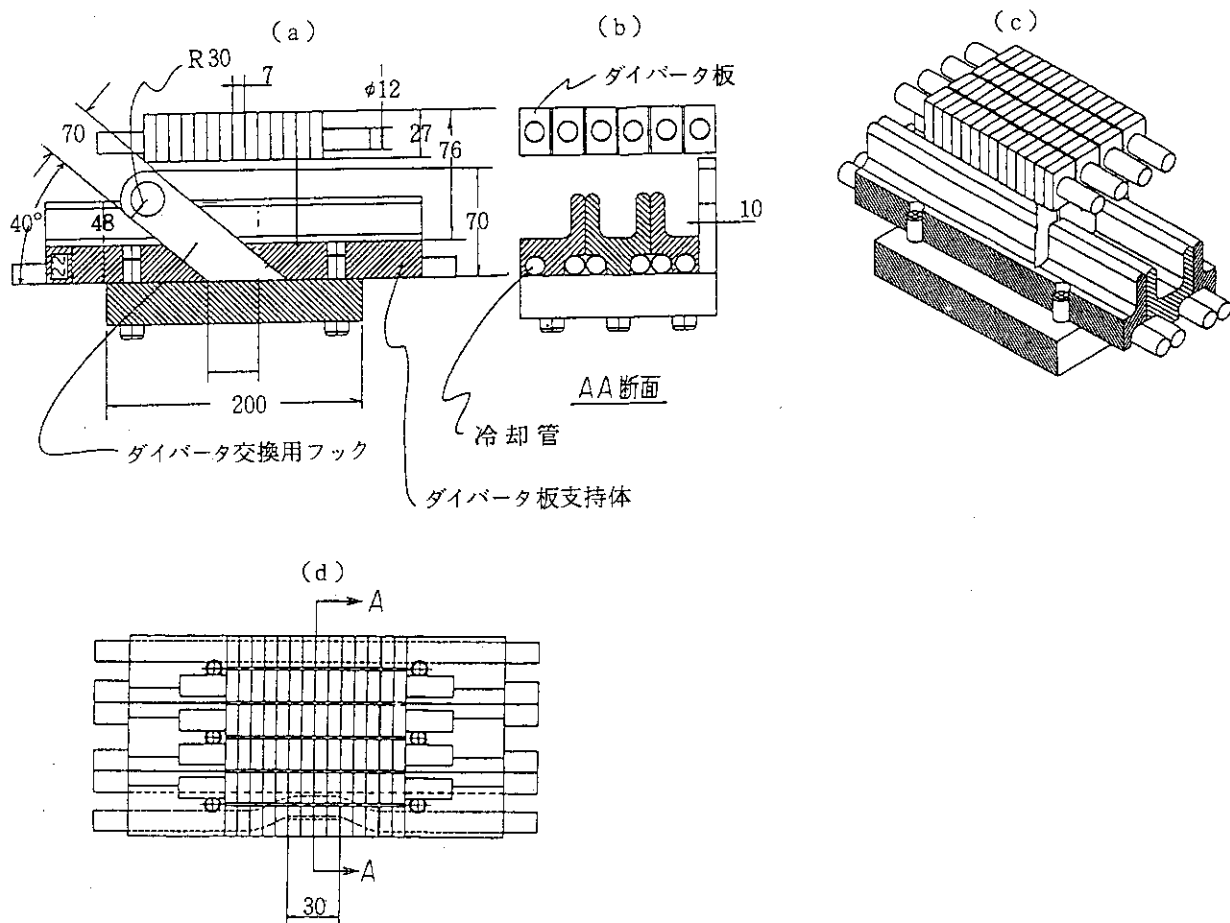


Fig. 4.9 Hook for divertor maintenance

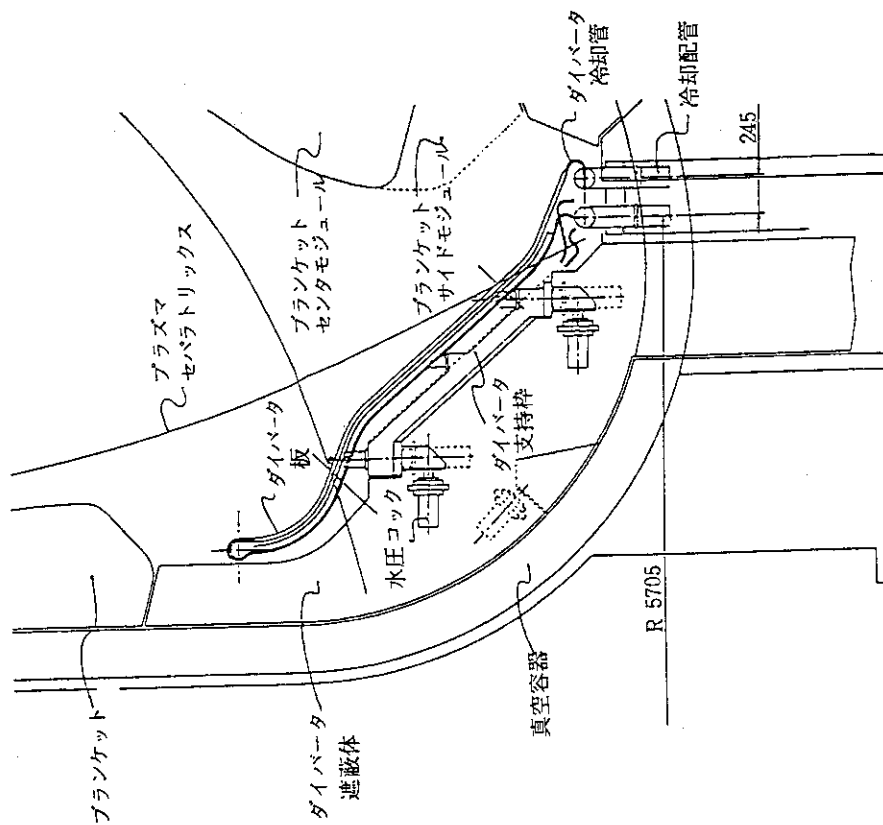


Fig. 4.10 Divertor structure

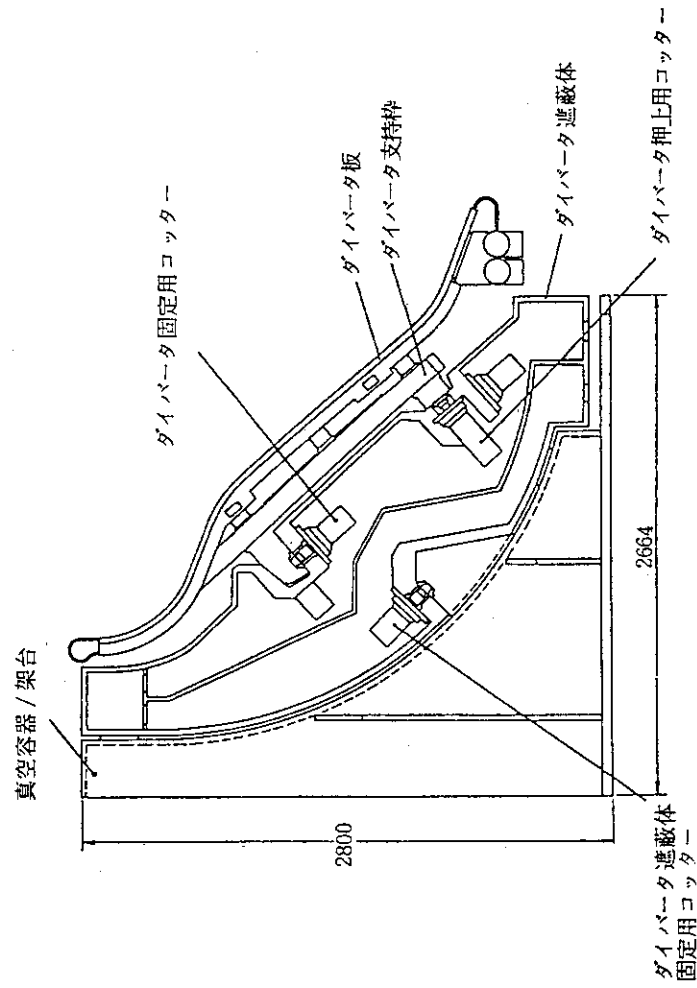


Fig. 4.11 Divertor support structure

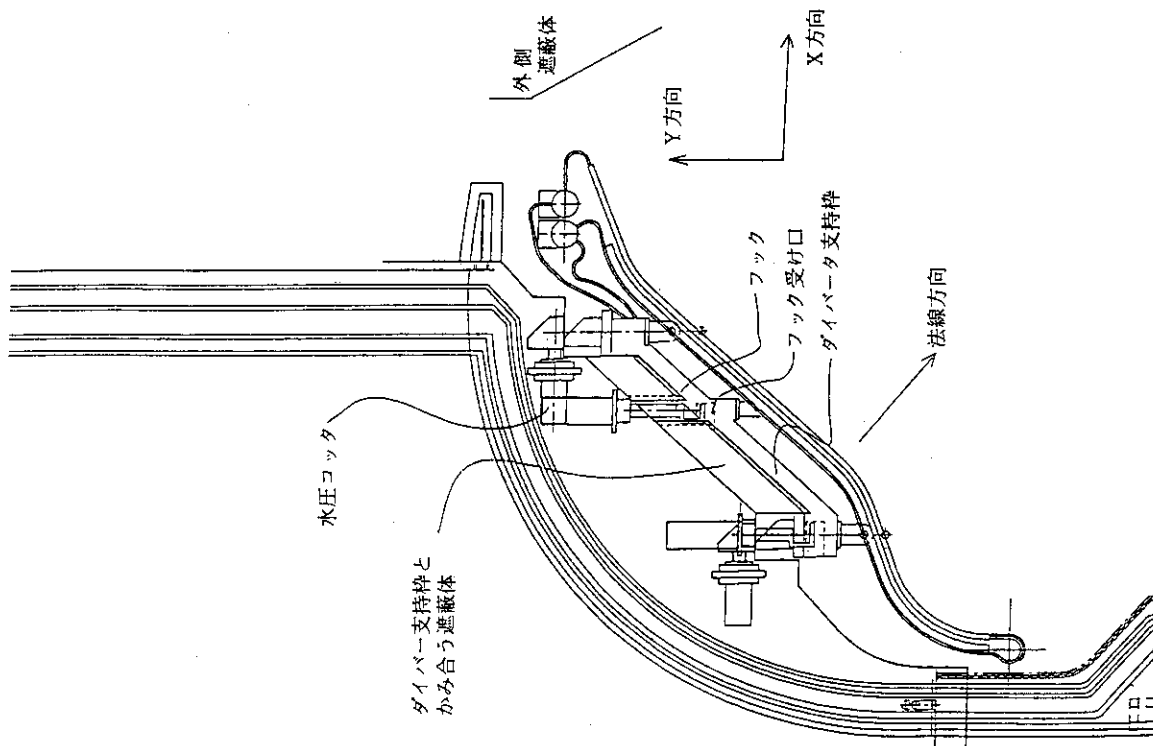


Fig. 4.13 Upper divertor

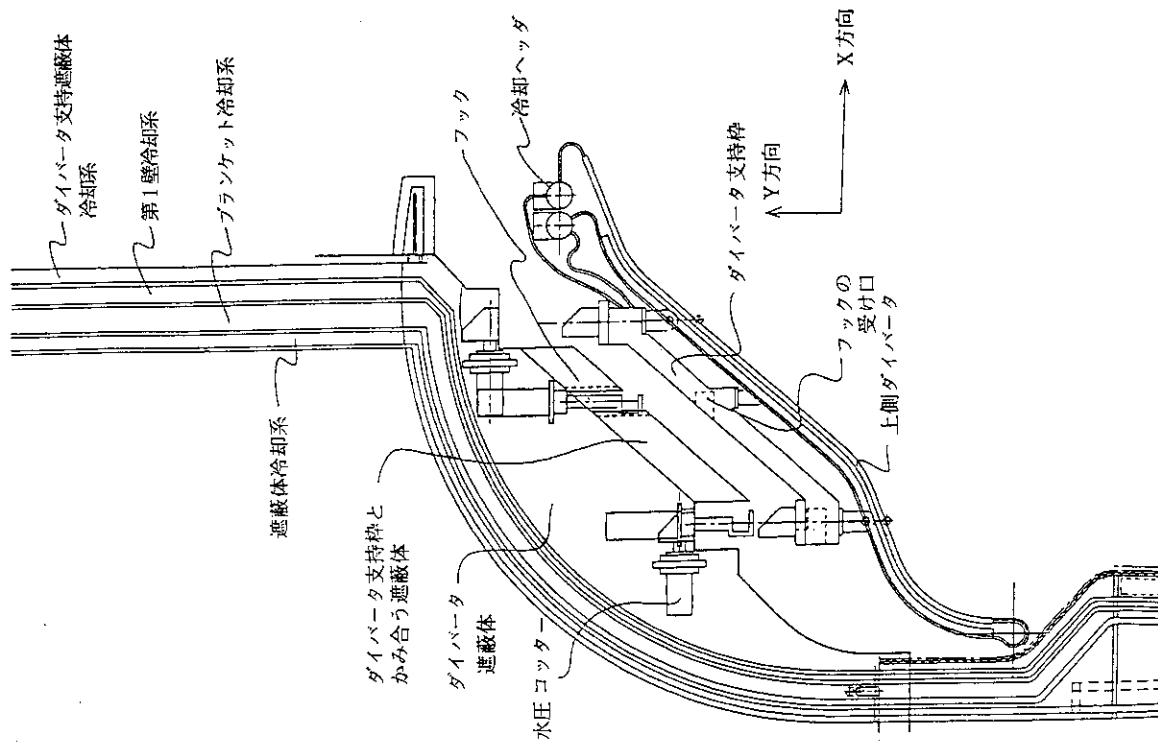


Fig. 4.12 Concept of upper divertor structure

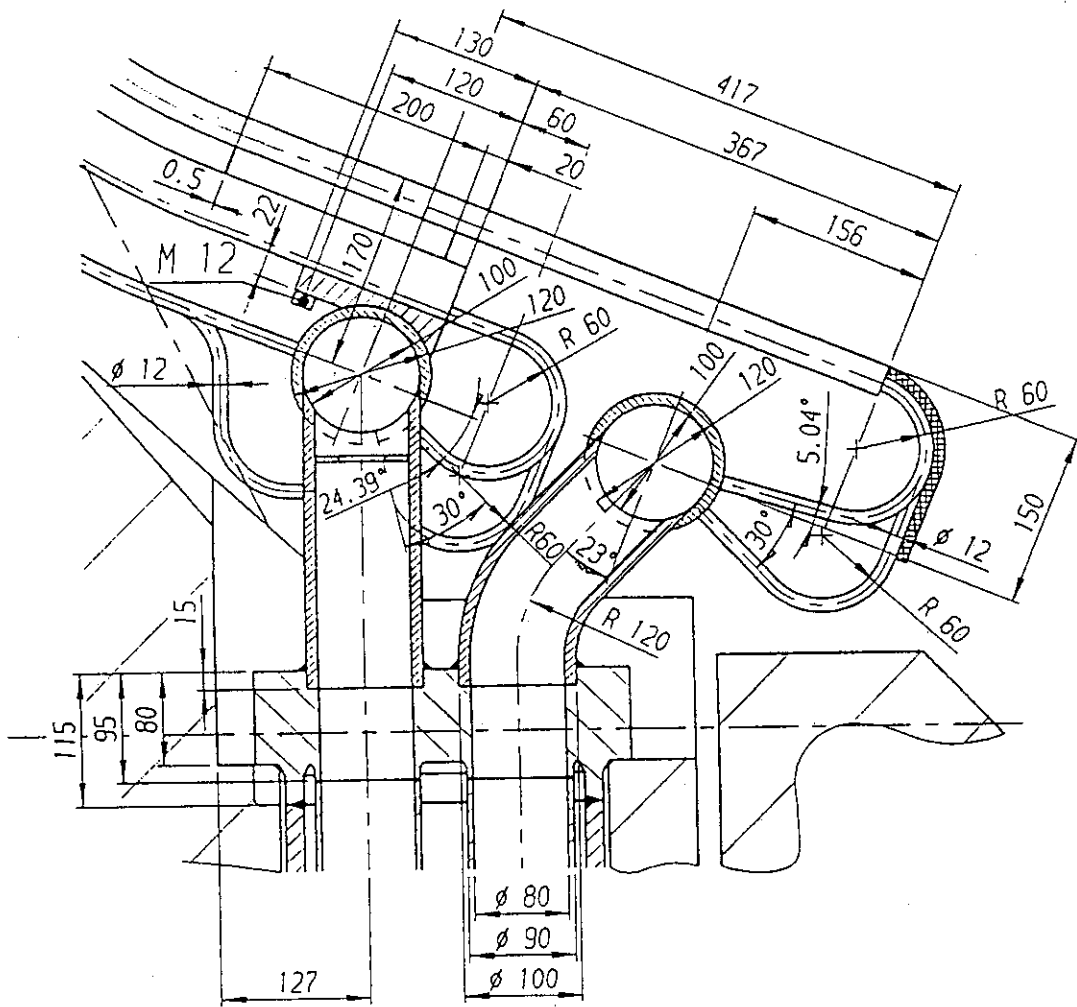


Fig. 4.14 Configuration of header/cooling pipe connection in CDA divertor plate

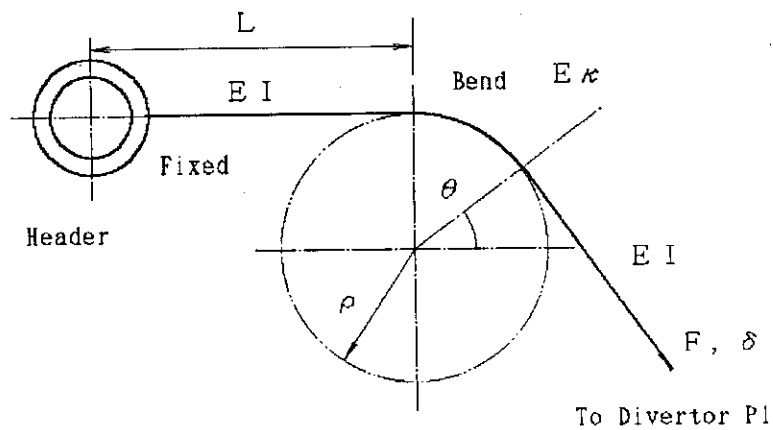


Fig. 4.15 Bend geometry of cooling tube

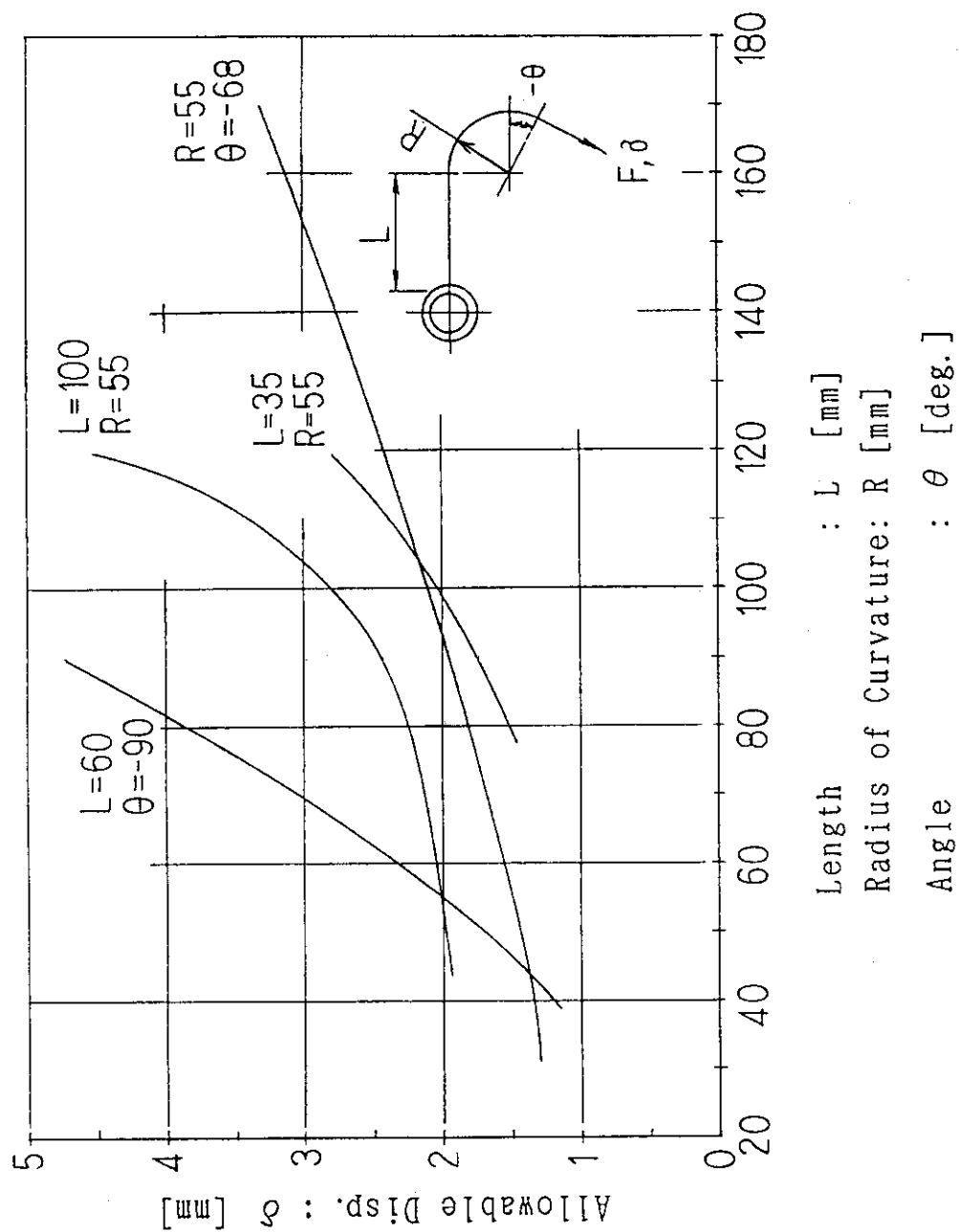


Fig. 4.16 Allowable axial deformation of curved pipe

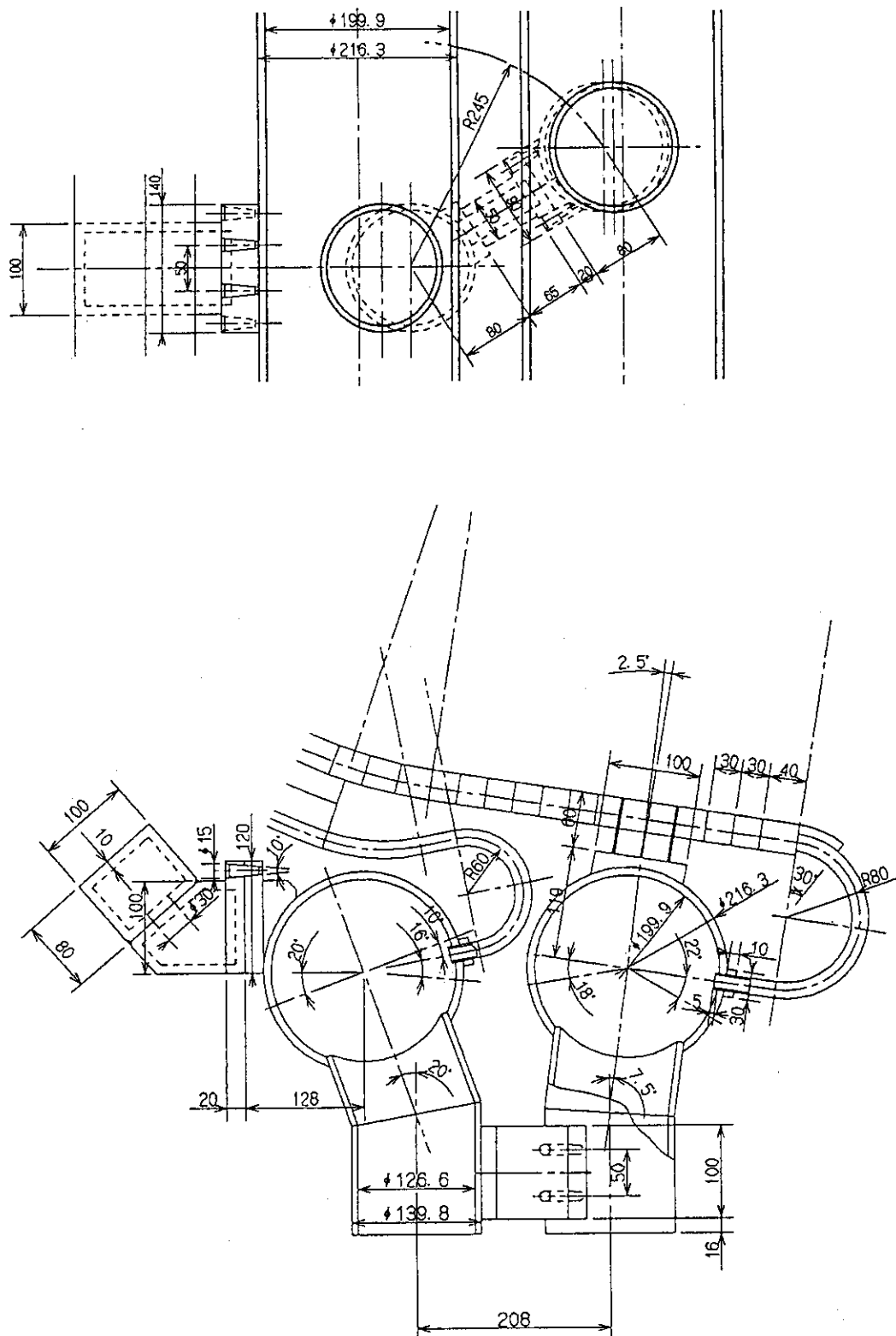


Fig. 4.17 Welding assembly of header and cooling pipes

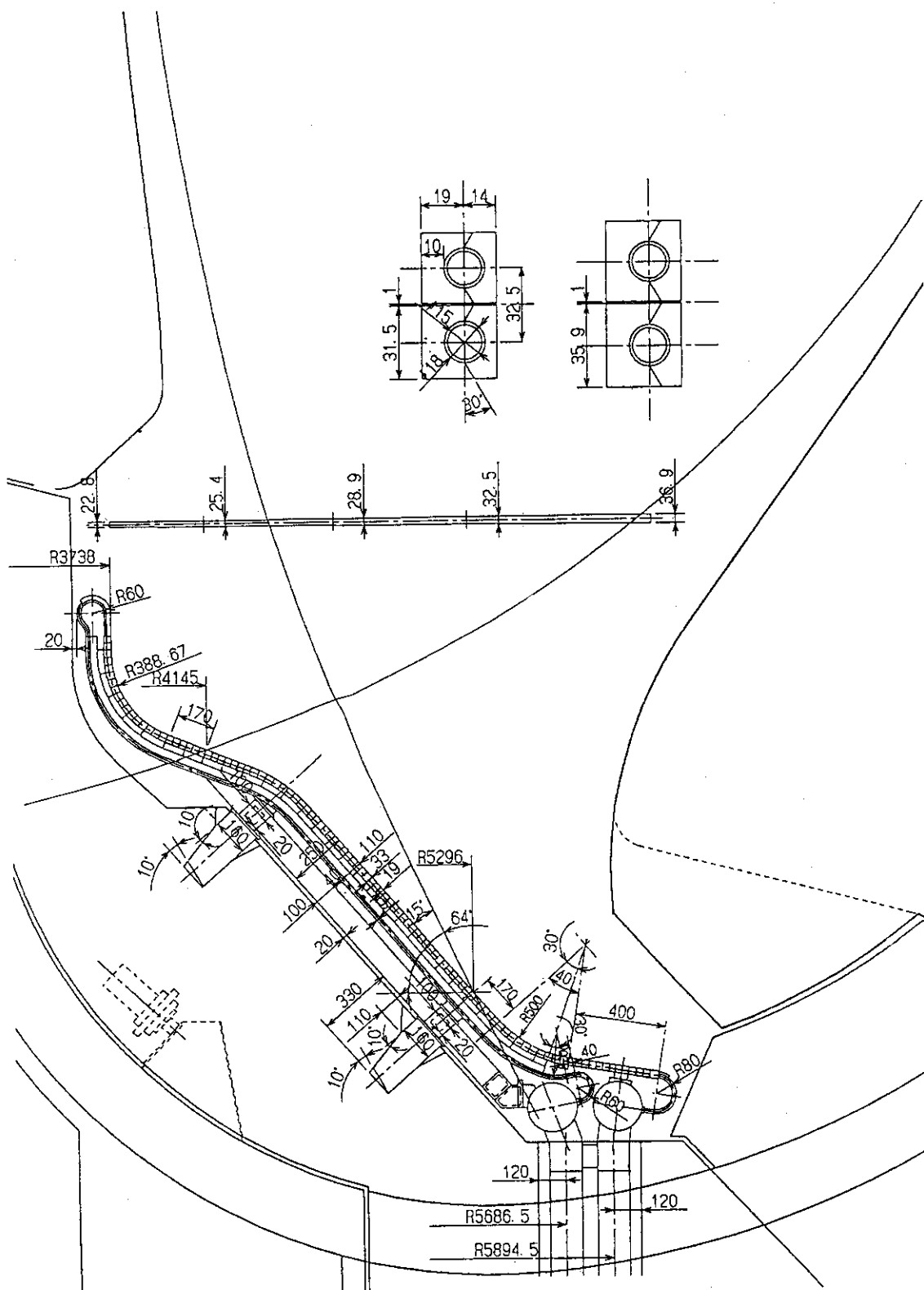


Fig. 4.18 Overall configuration of revised divertor plate

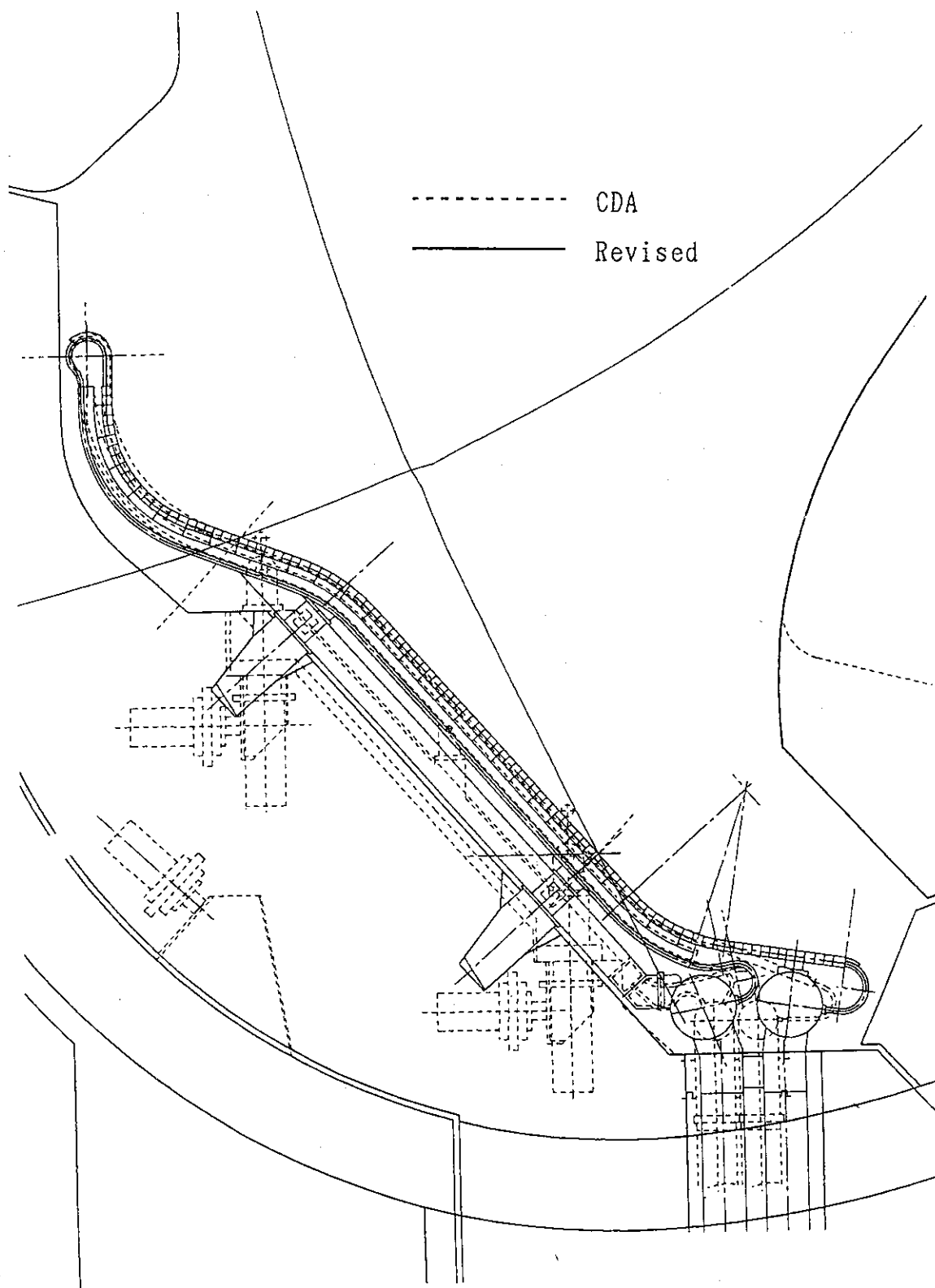


Fig. 4.19 Divertor plate configurations in CDA and present work

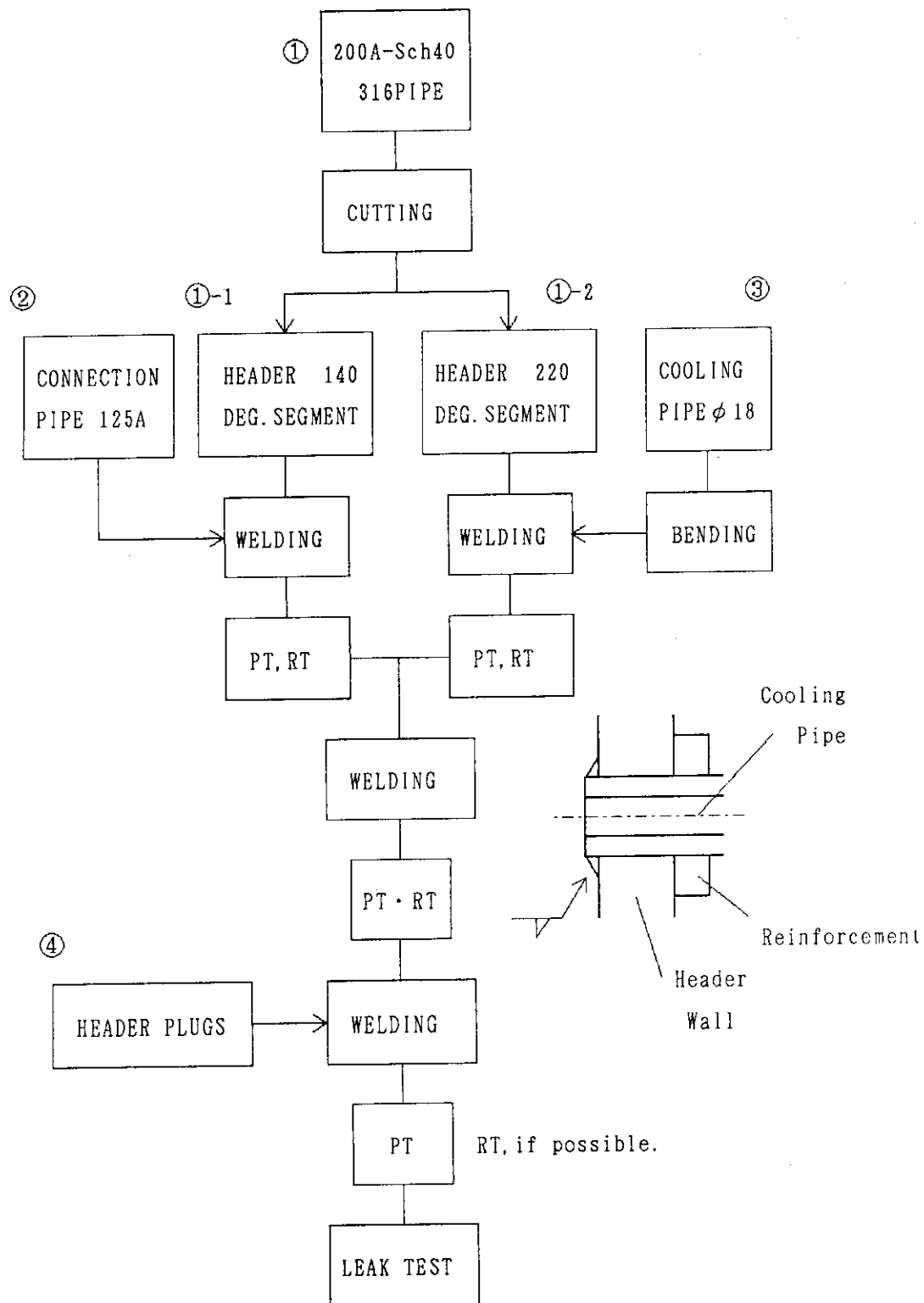


Fig. 4.20 Fabrication procedure of header/cooling pipe assembly

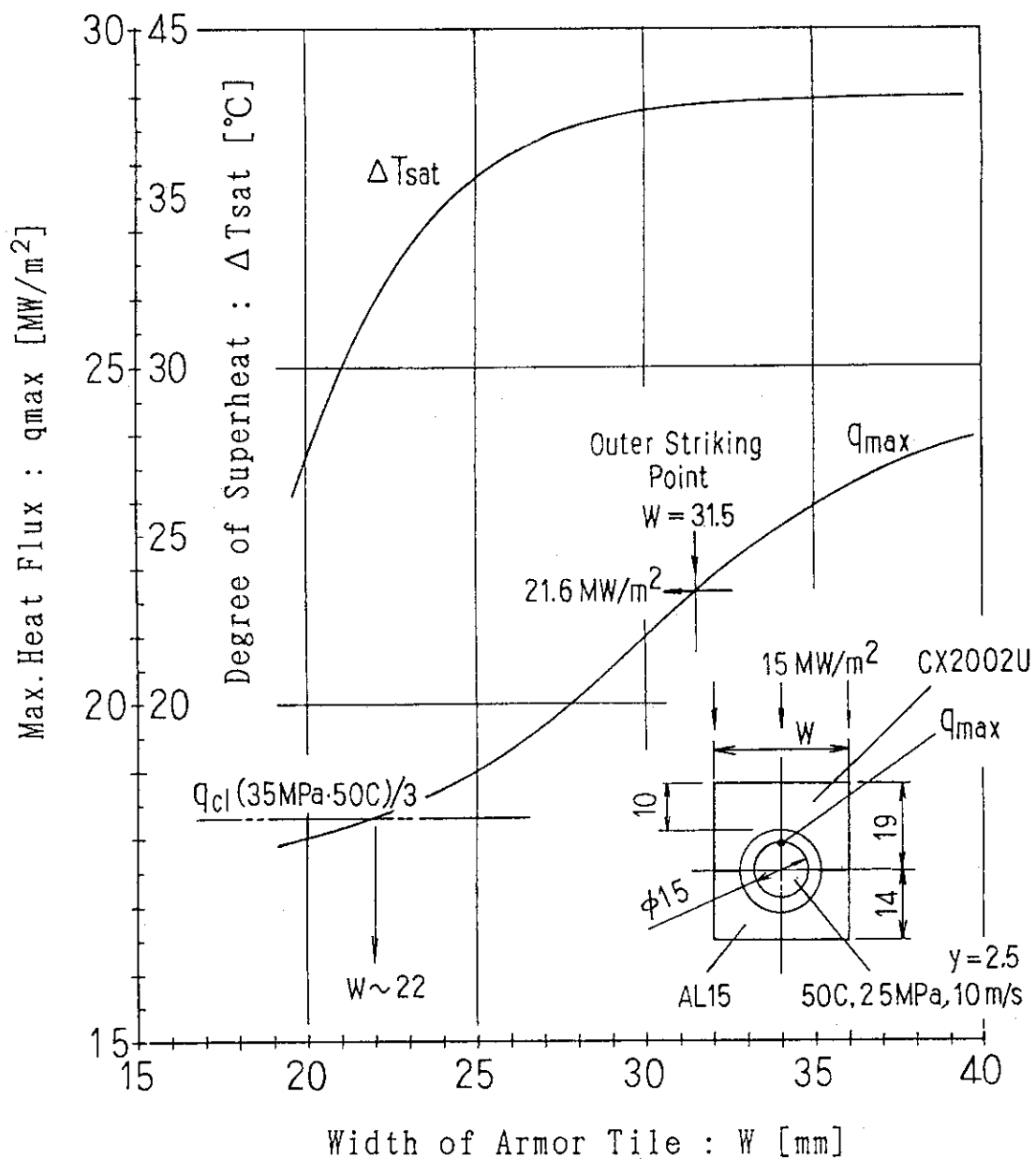


Fig. 4.21 Effects of armor tile width on maximum heat flux and maximum degree of superheat for swirl tube with an inner diameter of 15mm.

5. 構造解析

5.1 ダイバータ板の電磁力・応力解析

プラズマディスラプション時にダイバータ板に生じる電磁力を、従来、簡略化した計算で行っていた。今回、原研で開発したコードを用いて、真空容器による電磁氣的遮蔽効果を考慮して、ダイバータ板に生じる渦電流による応力を求めた。

Fig. 5.1に、現在ITERで考えられているモノブロック型のダイバータ板概念を示す。アーマ材はC/C材で、冷却管はアルミナ分散強化銅で、それぞれ作られる。プラズマディスラプション時に渦電流を誘起するのは、冷却管である。各冷却管がヘッダを通じて電氣的に繋がっていると、ディスラプション時に大きな渦電流のループができて、機械的強度に耐えられないことが考えられる。機械的強度に耐えるには、何チャンネルまで電氣的に結合してよいか（何チャンネルまで束ねられるか）を以下で調べる。

上記銅パイプを、中実矩形の板（厚さ5mm）にモデル化し、ダイバータ板をトロイダル方向に10メッシュ、ダイバータ板1チャンネルをトロイダル方向に12メッシュに切り、解析した。プラズマ電流はディスラプション時に下方へ移動しながら22msで消滅する場合を想定する。

Fig. 5.2に、下側ダイバータ板を6チャンネル毎束ねた場合の、6チャンネル分に流れる渦電流分布を示す。渦電流は6チャンネル束ねたダイバータ板の周囲に多く流れ、トロイダル磁場とのカップルにより、ダイバータ板をねじる力が生じることがわかる。

Fig. 5.3(a)は束ねたチャンネル数に応じて流れる渦電流密度の最大値をプロットしたものである。束ねるチャンネル数が多い程、多くのフラックスが束ねたチャンネルを通過するので、多くの渦電流が流れることになる。Fig. 5.3(b)は、ダイバータ板1チャンネルに流れる渦電流分布を示す。(a)から、1チャンネルに流れる渦電流は $j = 0.3 \times 10^5 \text{ (A/m)}$ である。(b)から、最大渦電流の局在して流れる幅を0.0015(m)と見積ると、トロイダル磁場(4.85T)とのカップルによる電磁力は $F = 7.4 \times 10^2 \text{ (N)}$ となる。ねじりによるせん断応力は、 $\tau = 100 \text{ MPa}$ である。アルミナ分散強化銅の降伏応力は $\sigma_y = 410 \text{ MPa (100}^\circ\text{C)}$ であるから、最大せん断降伏応力は $\tau_y = \frac{1}{2} \sigma_y = 205 \text{ MPa}$ となる。

チャンネル1本の場合、上記計算により $\tau < \tau_y$ で機械的強度には耐え得る。2チャンネル束ねると $\tau = 200 \text{ MPa}$ となり $\tau \approx \tau_y$ となる。従って、ダイバータ板の各チャンネルは電氣的には独立にすべきであることがわかる。これは、従来の手計算と同じ結論である。

5.2 ダイバータ支持枠の電磁力・応力解析

ダイバータ支持枠に働く電磁力を求め、電磁絶縁が必要かどうかを検討する。Fig. 5.4に用いた

モデルを示す。電磁氣的遮蔽効果を考慮するために、真空容器、ダイバータ板も含めて計算する。真空容器はポロイダル方向に44メッシュ、トロイダル方向に1メッシュに分割する。ダイバータ板のメッシュ数は5.1節で用いたのと同じである。ダイバータ支持棒はFig. 5.4(b)に示すメッシュ構造とする。Fig. 5.4(b)はダイバータ支持棒の対称な半分を示す。電気絶縁をダイバータ支持棒に入れる場合には、計算のし易さからFig. 5.4(b)の下端の4ヶ所に電気絶縁物を設けることとする。実際にはFig. 5.4(b)の縦方向に4本ある棒の、それぞれどの位置に電気絶縁物を設けても効果は同じである。プラズマディスラプションは1MA/1msでの下方へのプラズマ移動消滅を仮定する。

ダイバータ板1モジュールには32チャンネルの冷却管をITERでは設置する。ダイバータ板がディスラプション時の電磁力に耐えるには、各チャンネルをそれぞれ電氣的に独立にする必要があることを示した。ここでは、ダンバータ板の電磁氣的遮蔽効果を見る意味合いもあって、各チャンネルが全て電氣的に独立な場合と、18チャンネルを電氣的に連結した場合とについて、それぞれダンバータ支持棒に電気絶縁物を設けた場合と設けない場合について計算した。

Fig. 5.5は上側ダイバータ支持棒に流れる渦電流分布を示す。これは電気絶縁物を設けないダイバータ板支持棒で、ダイバータ板は18チャンネルを電氣的に凍結した場合である。Fig. 5.5は渦電流が最大になったディスラプションに発生後10msでの渦電流分布である。この時の電磁力分布をFig. 5.6に示す。下側ダイバータ支持棒より多少(6%程度)多くの渦電流が上側ダンバータ支持棒に流れるが、渦電流分布型はほぼ同じである。また、ダイバータ板の各チャンネルが電氣的に全て独立な場合と、18チャンネル凍結した場合とも渦電流分布型はほぼ同じである。

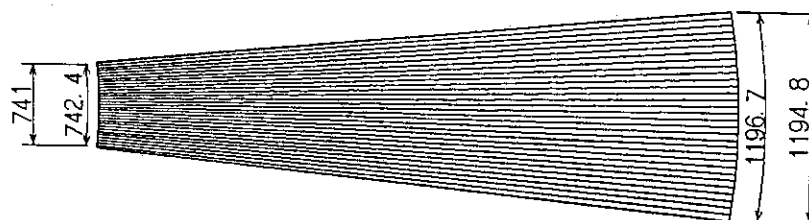
Table 5.1にダンバータ支持棒に流れる渦電流の最大値をまとめて示す。Table 5.2にその時の電磁力を示す。ダイバータ支持棒に電気絶縁物を設けない $j = 5.64 \times 10^4$ (A/m) の場合について、ダイバータ支持棒に働く応力を計算する。ダイバータ支持棒の幅は0.05(m)であるからダイバータ支持棒に流れる渦電流は $I = 2.8 \times 10^3$ (A) である。ダイバータ支持棒の長さは2.54(m)であるから、それに加わる電磁力は $F = 3.5 \times 10^4$ (N) である。ダイバータ支持棒の両端を自由端とした時の曲げ応力は $\sigma = 300$ (MPa) になる。SUS(100°C)の最大引張応力は $\sigma_u = 500$ (MPa)、降伏応力は $\sigma_y = 220$ (MPa) であるので、 $\sigma > \sigma_y$ となり、電気絶縁物なしではダイバータ支持棒は電磁応力に耐えれない。電気絶縁物を設けると $\sigma = 30$ (MPa) となり電磁的応力に耐え得る。従って、ダイバータ支持棒には、電気絶縁物を設ける必要があることになる。

Table 5.1 Maximum eddy current in the divertor support

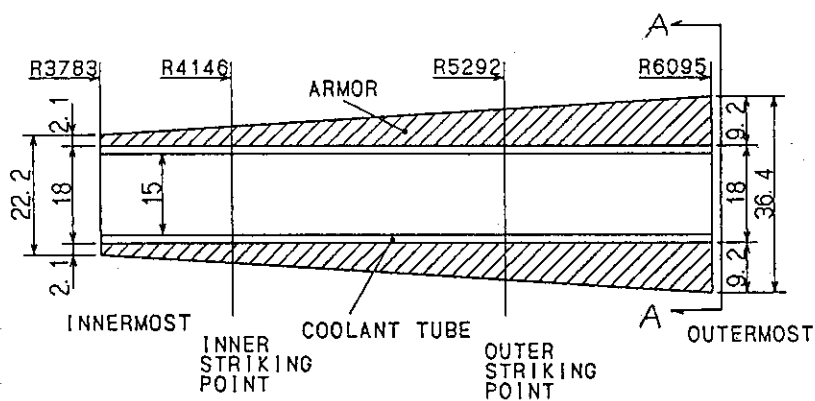
ダイバータプレート のチャンネル分割数	ダイバータ支持棒の 電気絶縁物の有無	最大渦電流値 (A/m) J
各チャンネル全て独立	有	5.87×10^3
	無	5.64×10^4
18チャンネル連結	有	5.76×10^3
	無	5.49×10^4

Table 5.2 Maximum electromagnetic force on the divertor support

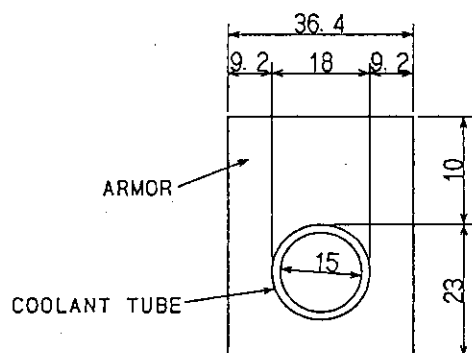
ダイバータプレート のチャンネル分割数	ダイバータ支持棒の 電気絶縁物の有無	最大電磁力 (Pa)
各チャンネル全て独立	有	3.46×10^4
	無	2.85×10^5
18チャンネル連結	有	3.39×10^4
	無	2.77×10^5



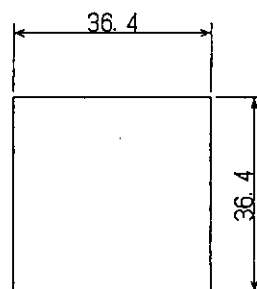
(a) ダイバータ板 1 モジュール分の図
1モジュール32チャンネル, チャンネル間ギャップ1mm



(b) ダイバータ板 1 チャンネルの拡大図



(c) A A 断面



(d) ダイバータ板
上のタイル

Fig. 5.1 Concept of monoblock divertor plate

time = 22 ms after disruption

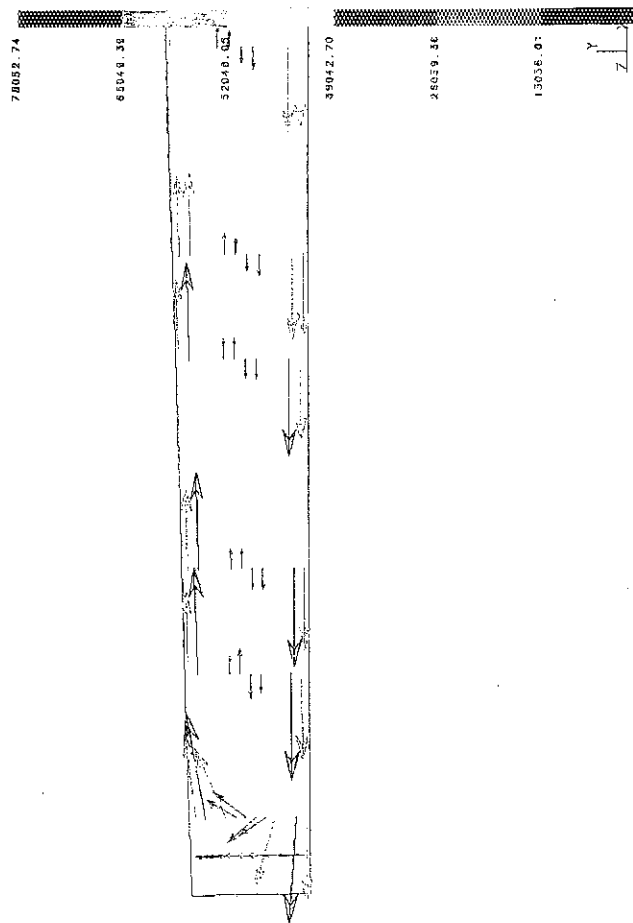
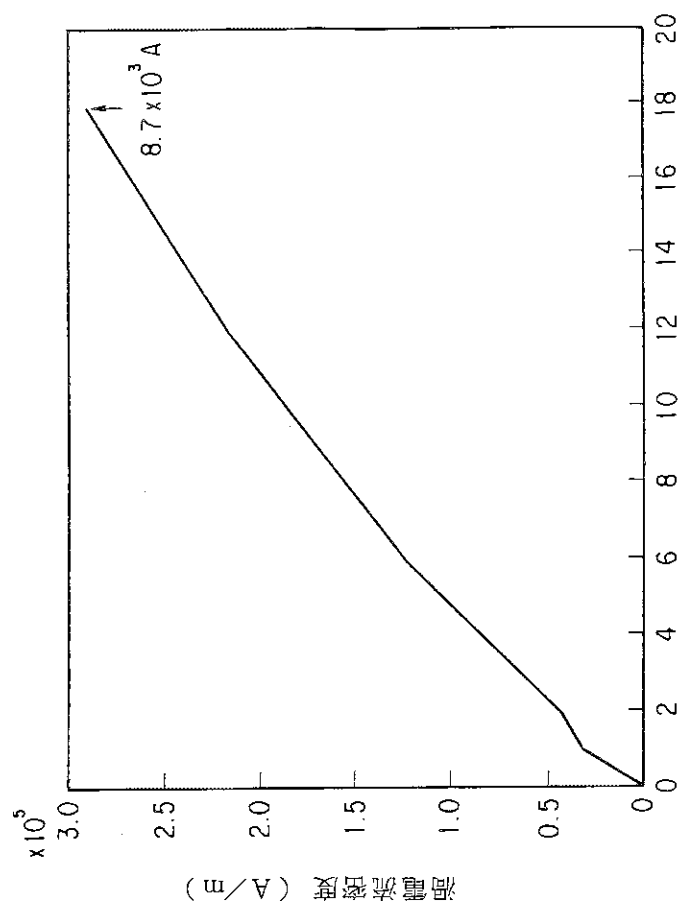


Fig. 5.2 Eddy current distribution of lower divertor plate (bundle of six coolant tubes, unit: A/m)



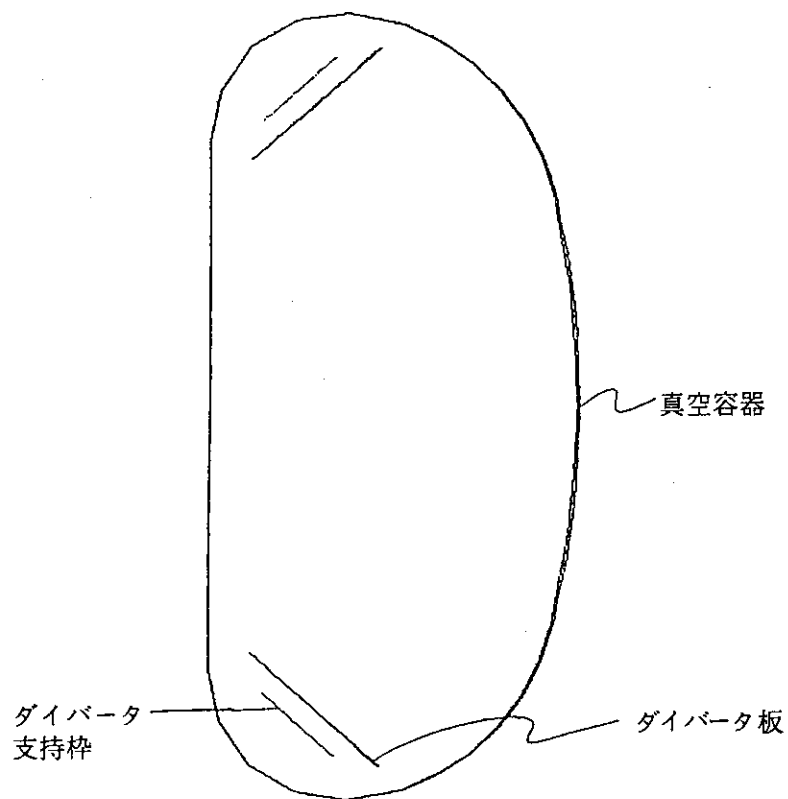
ダイバーター板の束ねたチャンネル数 (本)

(a) ダイバーター板に流れる渦電流密度

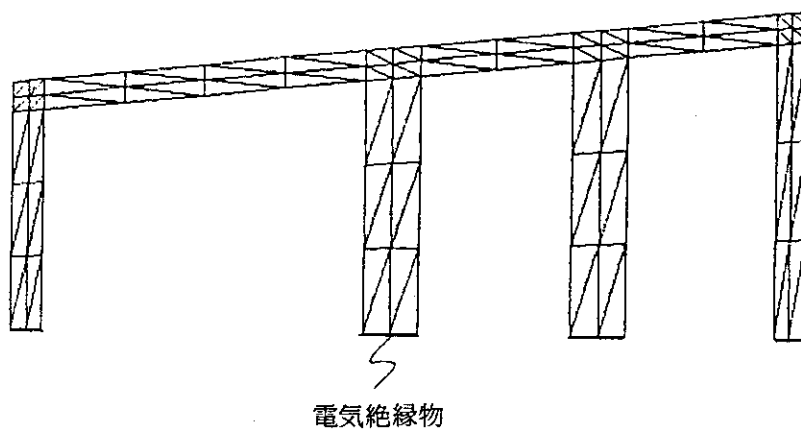


(b) 1 チャンネルに流れる渦電流分布

Fig. 5.3 Eddy current behavior of divertor plate



(a) 電磁力解析モデル



(b) ダイバータ支持棒

Fig. 5.4 Analytical model of electromagnetic force during disruption

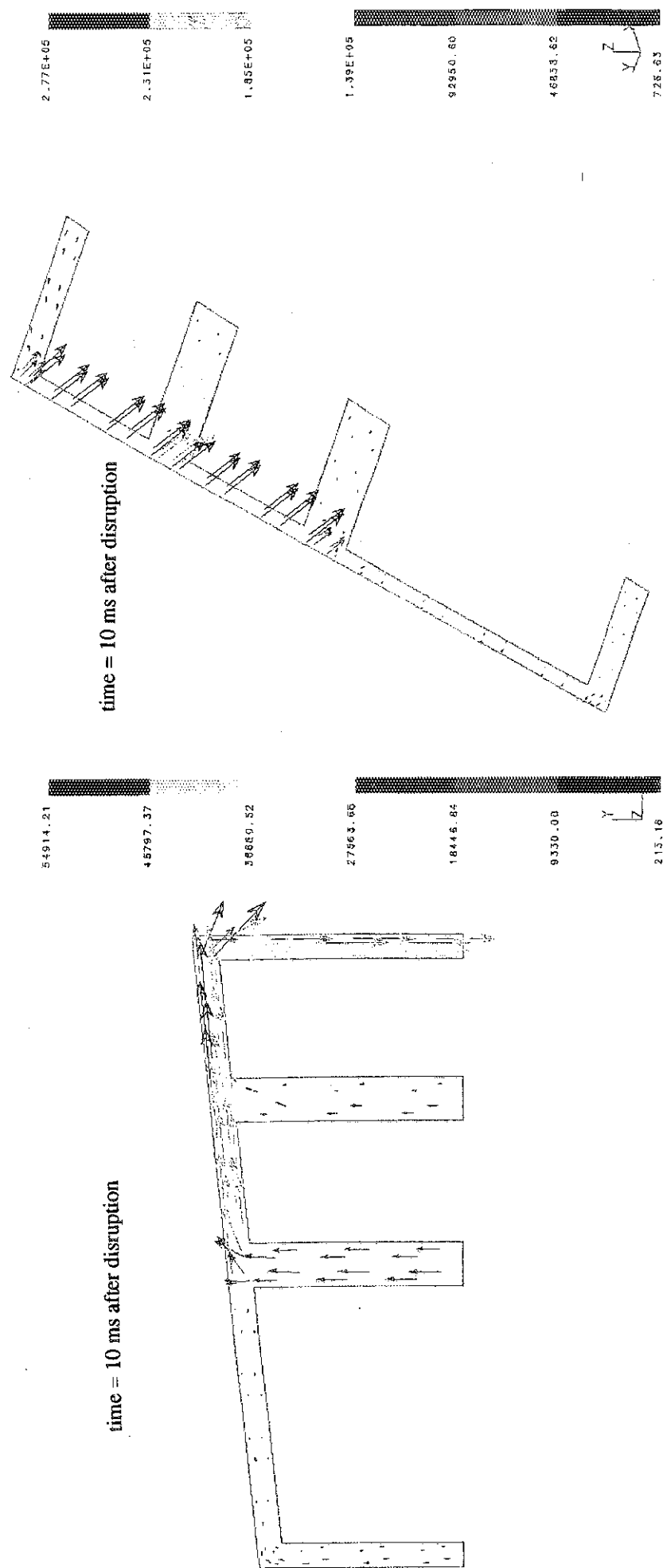


Fig. 5.5 Eddy current on upper divertor support frame (without electrical insulation, unit: A/m)

Fig. 5.6 Electromagnetic force on upper divertor support frame (without electrical insulation, bundle of 18 coolant tubes, unit: Pa)

6. 試作開発

水圧コッター方式の成立性を検証するためには、まず駆動源の開発が必要である。ダイバータ板の支持／押上のためには高い設置精度の要求から点支持が有力と考えられ、ピストン型駆動機構を選定した。ピストン型駆動機構の開発上の課題は適切なシールリングの材質選定とベローズの耐久性がその主なものである。仕様を満足する駆動機構が開発された後は、それらを実現模のダイバータ遮蔽体に組み込み取付特性を検証することとする。

6.1 駆動機構とコッターの設計

固定支持用及び押上用のピストン型駆動機構の主な仕様を表6.1に示す。

ベローズの山数を決める際には、固定支持用の大駆動力／短ストロークでは作動水圧が重要なパラメータとなり、押上用の小駆動力／長ストロークではベローズ全長が重要なパラメータとなる。Fig. 6.1に固定支持用としてピストン外径 $\phi 110\text{mm}$ で寿命1000回と設定したときベローズ山数をパラメータに作成した圧力ストローク線図を示す。6トンの駆動力で30mmのストロークを得るには50の山数が必要となる。Fig. 6.2には一段型押上用としたときのストロークと寿命をパラメータに全長-山数線図を示す。2000回の寿命で135mmのストロークを得るには山数が83必要となり、全長は365mmとなる。これを二段式で設計すると全長は300mm程度に短縮されるが、径が大きくなると同時に構造も多少複雑になる。

駆動機構はピストンに反応が加わったときベローズに荷重がかからないように構成に工夫を施しているが、より安全のため反力に対しては摩擦力によって駆動源への荷重伝達を阻止することとする。Fig. 6.3の(A)に垂直方向の荷重伝達力に対するコッター押込力の比とコッターの勾配の関係を摩擦係数をパラメータとして示し、(B)にはコッター引抜に対するものを示す。(B)から判るように摩擦係数を0.2程度とするコッターの勾配を 15° とすることによってコッターの抜け落ちを防ぐことができる。この形状の場合、6トンのピストン駆動力に対して8トンの垂直力が得られる。

6.2 駆動機構の試作と試験

試作の対象としたピストン型駆動機構は、コッターの打ち込み、引き抜きの2方向動作ができるように複動型のピストンとし、開発目標に応じて“要素開発型”、“小型”および“長ストローク型”の三種を取り上げた。それらの概念図と主な仕様をFig. 6.4に示す。

“要素開発型”は最初に試作した型であり、基本的機構の成立性の確認とシールリングの材質選定およびシールリングの設置箇所（ピストン側かシリダー側か）の設定を主な目的とした。ここで成果を基に固定支持用の“小型”と押上用の“長ストローク型”を試作し仕様確認の試験を実施し

た。尚, “長ストローク型”の試作は製作難易度の高い二段型とした。

ピストンとシリンダー間での気密を保持するためのシールリングは, 三種類の材質, 即ち軽水炉の制御棒に用いられている水との親和性の良いグラファイト, ステンレス鋼より柔らかい材質としてマンガン青銅および, ステンレス鋼より硬い材質としてインコネルのそれぞれを試験に供した。シールリングの設置箇所についてはピストンに取り付ける場合とシリンダーに取り付ける場合を試験し, シールリング材にはグラファイトを用いた。マンガン青銅とインコネルについてはピストン側に設置した。試験条件とそれぞれにおけるシールリングからの水の洩れ量の結果をTable 6.2に示す。洩れ量に対する明確な基準を設けることは難しいが, 洩れる量が甚だしいと印加した水圧が有効に駆動力に伝達されない可能性がある。印加水圧と得られる駆動力は比例関係に有り, $100\text{kg}/\text{cm}^2\text{-g}$ の水圧で, いずれの場合も押し込み時で ~ 17.5 トン, 引き抜き時で ~ 13 トンの駆動力が得られ, 有効断面積からの計算と一致し洩れの影響は無視できる。これらの結果を踏まえ, シールリングの材質は加工の容易なマンガン青銅とし, 設置箇所は少しでも多くの有効面積が確保できるピストン側とした。

設計圧力の1.5倍の圧力($150\text{kg}/\text{cm}^2\text{-g}$)を印加し, ベローズの耐圧試験を行ったが, ベローズからの水洩れ及びベローズの異常変形は見受けられなく, 健全であった。

基本的な技術を先の“要素開発型”で確立し, “小型”と“長ストローク型”の試作物に対しては洩れ量と駆動力を主な試験項目とした。洩れ量の測定結果をFig. 6.5に示し, 内圧に対する発生駆動力をFig. 6.6に示す。耐久試験については所定のストロークを1000回往復させたが異常は見られなかった。

6.3 実規模ダイバータ支持構造体の試作

実規模ダイバータ支持構造体の試作の主な目的を以下に記す。

- ① ダイバータ及びダイバータ支持構成部品の製作性と操作性を検証
- ② 複数の水圧駆動機構による総合的な動作性能の確認
- ③ マニピュレータによるダイバータの操作性の検証

実規模ダイバータ支持構造体の全体図をFig. 6.6に示す。構成部品の詳細については順次以下に述べる。

(a) コッター駆動用水圧駆動機構

本駆動機構は, 前回のピストン型水圧駆動機構の開発で試作した駆動機構とほぼ同じ寸法, 性能で製作した。ダイバータ固定用の4台ほか, 前回の試作品のフランジ部を取り替えて流用した。ダイバータ支持構造体固定用の1台の計5台を使用する。シリンダー内径 $\phi 110\text{mm}$, 長さ 263mm , ピストンストロークは 30mm で, ピストンの駆動圧力は最大 $65\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ (押込力 6.2TON :計算値)である。真空シール部材には, インコネル718当品の溶接ベローズ(2重)を使用し, ピストンとシリンダー間のシール材には, マンガン青銅のシールリングを2段に設けた。ピストンロッドとガイドブッシュにはスライドキー(溝)を設け, ベローズに振じりが作用しない構造と

した。また、シリンダーとシリンダーガバーはフランジ接続とし、分解して内部点検が容易に行えるようにした。本駆動機構はダイバータ支持構造体内部に計5台設置するが、その取り付けはフランジ部のボルト締結で行う。実機では溶接で取付ける計画である。ピストン、シリンダー等の材質はSUS304を使用した。

(b) ダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構

今回のダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構は、設置スペースの制約と必要ストローク(135mm)から前回試作した2段のテレスコピック方式ではなく、コッター駆動用水圧駆動機構と同様の単筒型とした。シリンダー内径 ϕ 115mm、長さ365mm、ストロークは135mmで、ピストンの駆動圧力10kgf/cm²G、駆動力1.0トン(計算値)である。真空シール部材には、2重のインコネル718相当品の溶接ベローズを使用し、ピストンとシリンダー間のシール材には、マンガン青銅製のシールリングを2段設けた。ピストンロッドとガイドブッシュにはスライドキー(溝)を設け、ベローズに振りが作用しない構造とした。シリンダーとシリンダーガバーはコッター駆動用水圧駆動機構と同様フランジ、接続である。ピストン、シリンダー等の材質はSUS304を使用した。本駆動機構はダイバータ板を面に垂直に移動させるため、水平面に対し48°の角度で設置されており、半径方向内径側に1台、外径側に2台設置する。

(c) ダイバータ

今回試作のダイバータ、周方向に32分割された実機下側ダイバータの1モジュール分をプラズマに面する側の曲面を現状における実機形状を模擬して製作した。ダイバータの冷却水配管はトロイダル方向両端部に突出した部分のみ銅管で個数及び寸法を模擬して取り付けた。ダイバータの材質はマニピュレータによる取り扱いを考慮し、重量調整のためにアルミ合金を使用し裏面は重量削減のため凹形状に削り込んである。トロイダル方向両側面部には1200mmピッチでそれぞれ2箇所マニピュレータ把持部穴が設けてある。次の(d)ダイバータ支持棒とはボルト締結にて連結する。本部品の設計重量は、590kgfである。

(d) ダイバータ支持棒

ダイバータ支持棒は中心部をフランジで締結した左右対象の溶接構造物であり、内部は冷却水が流れる流路が形成されている。全体として半径方向内径側に2本、外径側に2本の計4本のダイバータ支持構造体に対する位置決め板(脚)を設け、それぞれにコッターブッシュが組み込まれている。位置決め板(脚)の先端部にはダイバータ支持構造体の位置決め穴部と接触する側の下方に回転自在のローラをダイバータ自重(ダイバータ+ダイバータ支持棒重量)による組み込み動作時の摩擦による抵抗力を軽減する目的で設置した。使用材質SUS304であり、中心部のフランジ面にはセラミックス(ホワイトアルミナ:厚さ100 μ m)を溶射し、左右を電氣的に絶縁している。4本の位置決め板(脚)およびローラの表面にも同様のセラミックス溶射によりダイバータ支持構造体との電氣的絶縁を確保した。セラミックス溶射部分の摺動面には摩擦による抵抗力軽減のため、固定被膜潤滑剤(二硫化モリブデン系:膜厚10 μ m)を焼き付けた。外径側端部にはダイバータの冷却配管とダイバータ支持棒冷却配管用ヘッダー(2本)実機を模擬した格好で取り付けた。ダイバータ支持棒の設計重量は476kgf、冷却配管ヘッダー部は75kgfである。

(e) ダイバータ支持構造体

ダイバータを連結したダイバータ支持棒が組み込まれる部分であり、ダイバータ用のコッター駆動用水圧駆動機構 4 台、ダイバータ（支持棒）をマニピュレータに受け渡す位置まで持ち上げる持ち上げ用水圧駆動機構 3 台、および本ダイバータ支持構造体を次の(f)真空容器架台に固定する水圧駆動機構 1 台が配設されており、コイル系に対する遮蔽機能を有する。上面は水平面から 48° の角度で傾斜し、ダイバータ支持棒の 4 本の位置決め板（脚）に対応する位置決め穴があり、下面には真空容器架台の凸部に対応させて一部に位置決め用のインロー部を有する凹部が設けてある。側面は各駆動機構の取り付け、取り外し及び配管作業等を考慮して開口部を大きくとる必要性からボルトで側板を取り付ける構造とした。実機では溶接で取り付けることにより、冷却水内に設置される駆動機構取り付け面からの真空容器内への冷却水の流入を防止できる。材質は SUS304 を使用し、位置決め穴部、真空容器架台の凸部に対応する凹部はその形状、寸法（肉厚）から铸造とした。上面の遮蔽部はアルミ合金で形状のみを模擬した。設計重量は側板、駆動機構を含め約 3700kgf である。

(f) 真空容器架台

ダイバータ支持機構体を直接支持するものであり、1500mm×2700mm の基礎架台にダイバータ支持構造体の取り付け部が実機周方向 $1/32$ 部分を模擬した大きさと溶接によって組み立てられる。上部曲面には、ダイバータ支持構造体の凹部との取り付け部となる位置決め用インロー部を一部に有する凸部が設けられ、ダイバータ支持構造体側に設置された固定用水圧駆動機構から打ち込まれるコッターの相手側となるコッターブッシュがその中心部に 1ヶ所配設されている。ダイバータ支持構造体の固定にはコッターの他、真空容器架台上部にボルト締めで連結も可能である。材質は SUS304 を使用した。基礎架台には床面に固定できるボルト穴を設けてある。設計重量は、4450kgf である。

(g) その他の部品

① コッター：

ダイバータ固定用に 4 個、ダイバータ支持構造体固定用に 1 個それぞれ円錐形状にて製作した。

材質は SUS304 で製作し、摺動面にはコルモノイ # 5 を溶射した。更にその上に固体被膜潤滑剤（二硫化モリブデン系）を焼き付けて耐摩耗性と摺動抵抗の軽減を図った。

② コッターブッシュ：

ダイバータ固定用に使用するコッターブッシュはダイバータ側とダイバータ支持構造体側とを電氣的に絶縁するため、コッターとの摺動面にはステライト # 6 + 固体被膜潤滑剤をコーティングし、ダイバータ（支持棒）と接する側にはセラミックス（アルミナ）を容射した。コッターブッシュの取り付けフランジ部と容射部とは分離しており、フランジセラミックス容射部と接する。コッターブッシュの母材およびフランジは SUS304 で製作した。

③ センシング用ダイバータ：

ダイバータ支持構造体の側板にはマニピュレータによってダイバータを取り扱う時、位置検

出器の指標となる幅250mmのセンシング用ダイバータが両側に取り付けられる。プラズマ側の面はダイバータ表面と同様な曲線を有する。このセンシング用ダイバータはSUS304で製作した。

6.4 実規ダイバータ支持構造体の試験

(1) 水圧駆動機構単体試験

			コッター駆動用 水圧駆動機構	持ち上げ用 水圧駆動機構
気 密 ， 耐 圧 試 験			○	○
動 作 試 験	無負荷動作確認試験		○	○
	重 荷 試 験	押込力測定	○	○
		引抜力測定	○	—
シ ー ル 特 性 試 験			○	○

試験結果は以下の通りである。

(a) 気密, 耐圧試験

① 気密試験

今回製作した2種類, 計7個の水圧駆動機構について, ベローズ単体および駆動機構組上がり状態におけるHe洩れ試験を実施し, 全て洩れ量が許容値 (1×10^{-7} atm cc/sec) 以下であることを確認した。

◎ コッター駆動用水圧駆動機構: 5.2×10^{-10} atm cc/sec (4個共)

◎ ダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構: 5.2×10^{-10} atm cc/sec (3個共)

② 耐圧試験

所定圧力の1.5倍の水圧を10分以上印加し, 加圧状態での洩れ及び試験後に分解して異常のないことを確認した。

◎ コッター駆動用水圧駆動機構: 98kgf/cm²G (設計圧力: cm²G)

◎ ダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構: 16.5kgf/cm²G (設計圧力: 11kgf/cm²G)

(b) 荷重試験 (押込力, 引抜力測定)

◎ コッター駆動用水圧駆動機構 (4個)

押込力：水圧66.1～66.8kgf/cm²Gで6301～6368kgf

引抜力：水圧65.1～65.9kgf/cm²Gで4578～4635kgf

4個共、設計値を満足する。

◎ ダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構（3個）

押込力：水圧9.8～10.1kgf/cm²Gで974～1003kgf

3個共、設計押込力1トンを満足した。

(c) シール特性試験

ピストンシールリングからの駆動水の洩れ量をそれぞれの駆動機構について、最大ストローク状態で測定した。

◎ コッター駆動用水圧駆動機構（4個）

押込側加圧状態：水圧64.8～65.5kgf/cm²Gで690ml～710ml

引抜側圧力状態：水圧64.5～65.2kgf/cm²Gで401ml～410ml（水温22～24℃）

圧力が高くなるほど洩れ量は増加するが、洩れ量は僅かな量に留まり、各駆動機構間に大きな差はない。

◎ ダイバータ持ち上げ用水圧駆動機構（3個）

押込側圧力状態：水圧10.0～10.2kgf/cm²Gで565ml～578ml（水温20～23℃）

各駆動機構間に大きな差はない。

(2) ダイバータ実規模モデル着脱動作確認試験

(a) ダイバータ支持構造体着脱動作確認試験

真空容器架台の凸部とダイバータ支持構造体側の凹部に設けたインロー部とが確実に所定位置に組み込まれることが確認された。取り外し動作も特に問題ない。

(b) ダイバータ支持構造体支持動作確認試験

固定用水圧駆動機構によるコッターの挿入、引抜動作は駆動作圧力20kgf/cm²Gから所定ストローク30mmの動作が可能である。ダイバータ支持構造体と真空容器架台の健全な支持、解放動作を確認した。

(c) ダイバータ持ち上げ、下降動作確認試験

ダイバータ自重（支持棒を含む）によるダイバータ支持構造体位置決め穴部の傾斜面に沿った組み込み動作を確認した。取り外し動作も特に問題ない。

持ち上げ用水圧駆動機構によるダイバータ（支持棒）の持ち上げ（ストローク：135mm）動作は3個の駆動機構の移動速度の調整が必要となり、水圧配管系のニードル弁の開閉によりほぼ等しい速度に調整して持ち上げ動作が可能であることを確認した。ダイバータ自重（支持棒含む）による下降動作も可能であった。

(e) ダイバータ支持動作確認試験

4個のコッター駆動用水圧駆動機構によるダイバータ（支持棒）の固定、解放は駆動圧力20kgf/cm²Gから所定ストローク30mmの押込、引抜動作が可能となる。4個のコッター挿入／引抜速度は多少不均一となるが特に問題はない。

水圧駆動のコッター方式によるダイバータ支持構造に関して、必要とされる要素技術を順次開発し、実規模システムの試作・試験を実施するに至った。システムの健全作動の確認試験を一通り終え、上記の結果を得て、設計の妥当性を確認した。今後の課題としては、複数の水圧駆動機構によるダイバータの持ち上げ／下降動作時の各水圧駆動機構のピストン移動速度の不揃いに起因してセルフロック現象に対する十分な対策が必要となる。水圧駆動機構の配置、移動速度の調整方法あるいは位置決め板（脚）と穴部とのギャップ及び形状の最適化等によりシステムの成立性を検討する必要がある。

一方、構造・機構共に複雑な上側ダイバータの着脱システムについては、設計を終えた段階であり、今後、試作・試験を通じて健全性を確認する必要がある。

Table 6.1 Specifications of cotter drive mechanism

型	固定支持用	押上用	
	一段	二段	一段
駆動力(トン)	6	1	
水圧(MPa)	6.5	1	
ストローク(mm)	30	135	
ピストン外径(mm)	110	一段目(250)/二段目(115)	115
全長(mm)	263	300	365
真空シールロス	溶接二重(0.3mm)	溶接二重(0.25mm)	
寿命(サイクル)	1000	1000	

Table 6.2 Materials installed positions and leakage of seal ring

	回数	引き抜き側加圧		押し込み側加圧		水温(°C)
		水圧 (kg/cm ² -g)	漏れ量 (ml/分)	水圧 (kg/cm ² -g)	漏れ量 (ml/分)	
マンガン青銅	0	99.5	737.5	100	632.5	-
	200	-	-	100	740	14
	400	-	-	99.2	630	-
	800	-	-	102	830	-
	1000	100.4	795	102	705	25-28.5
グラファイト (ピストン側)	0	97.2	3720	97	4410	27.3
	200	97.2	3510	94	4500	26.5
	1000	97.2	3810	97.2	4140	23.5
グラファイト (シリンダー側)	0	98	130	98	125	13
	246	98.8	78	98.4	40	18.5
	1000	98.4	39	98.8	25	16
インコネル	0	99.2	770	100	815	23
	500	100	785	100	745	18.5
	1000	100	760	100	815	13-21

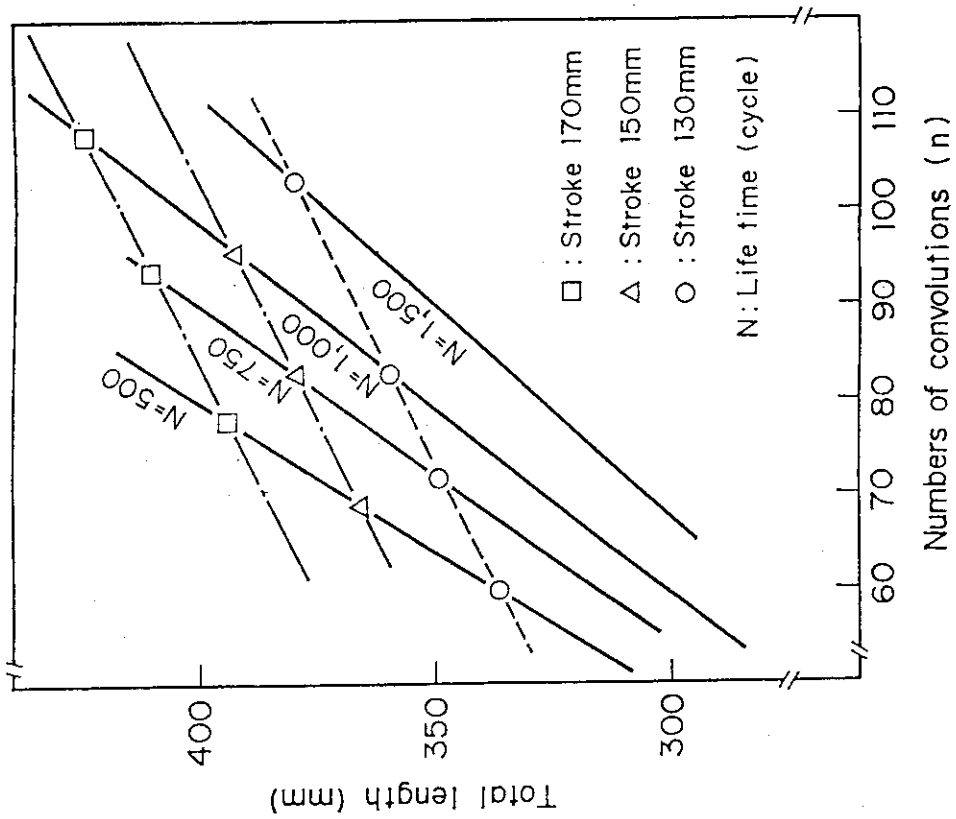


Fig. 6.2 Life curves of welded bellows determined by total length and number of convolution

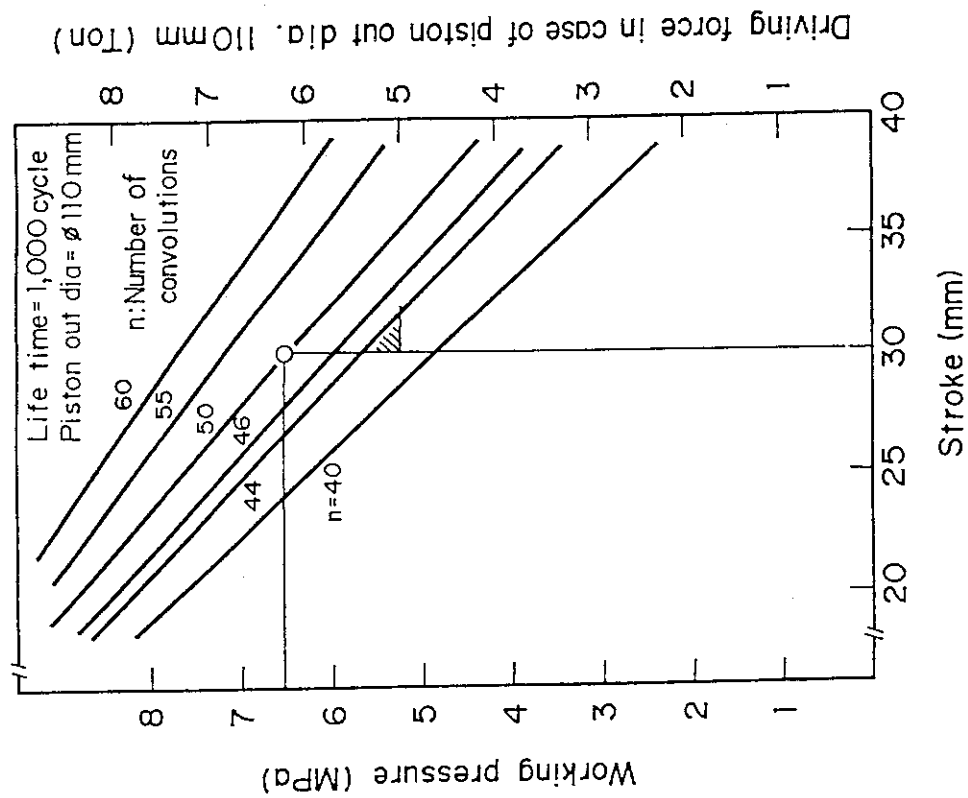


Fig. 6.1 Pressure-stroke diagram as a function of number of convolutions of welded bellows.

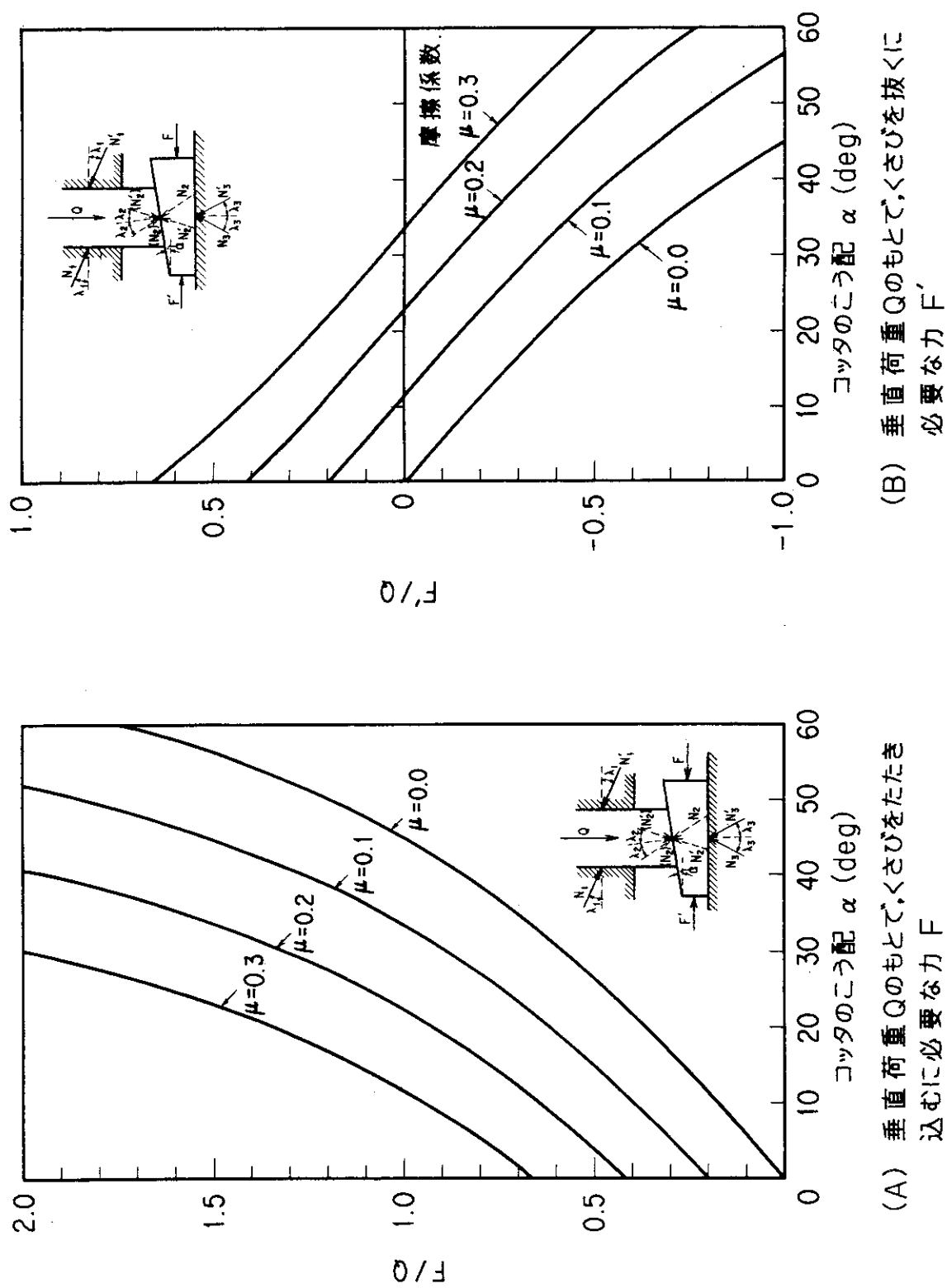
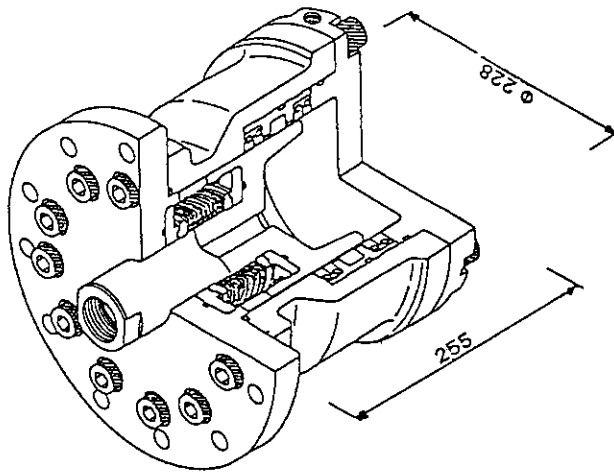


Fig. 6.3 Dependence of vertical load on cotter inclination

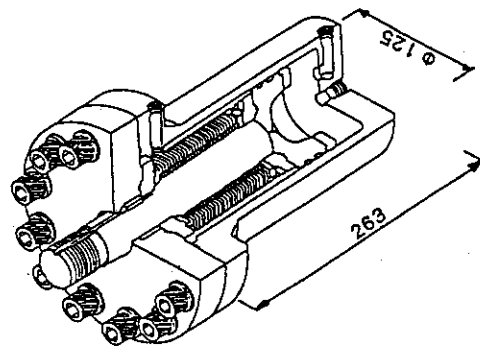


主要諸元	
全長	255 mm
シリンダ径	228 mm
ストローク	25 mm
駆動力	17.7ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	92.56/65.86mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	カーボン

大駆動力駆動機構
(ピストン突出状態)

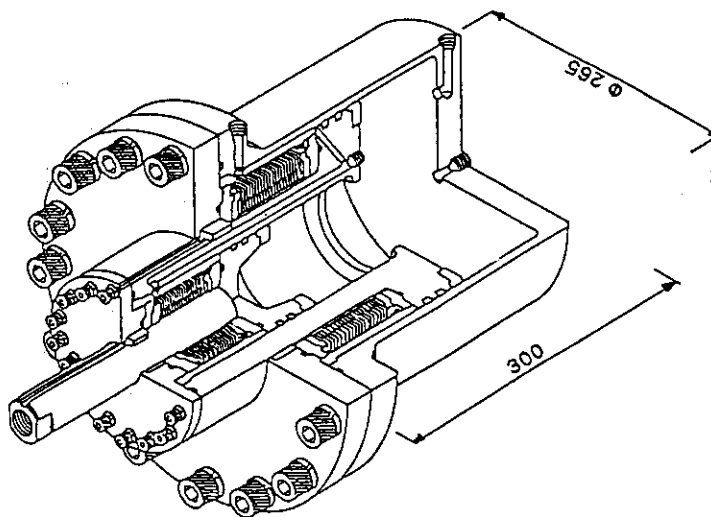


主要諸元	
全長	263mm
シリンダ径	125mm
ストローク	30mm
駆動力	5ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	69.59/42.87mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	マンガン青铜

小型駆動機構
(ピストン突出状態)



主要諸元	
全長	300mm
シリンダ径	265mm
ストローク	170mm
駆動力	1ton

ベローズ	
二重溶接ベローズ	
外径/内径	外径 266/166mm 内径 73/43mm
板厚	12MIL(0.305mm)
材質	インコネル718

シールリング	
材質	マンガン青铜

長ストローク型駆動機構 (テレスコピック型)
(ピストン突出状態)

Fig. 6.4 Concept on cotter drive mechanism and its specification

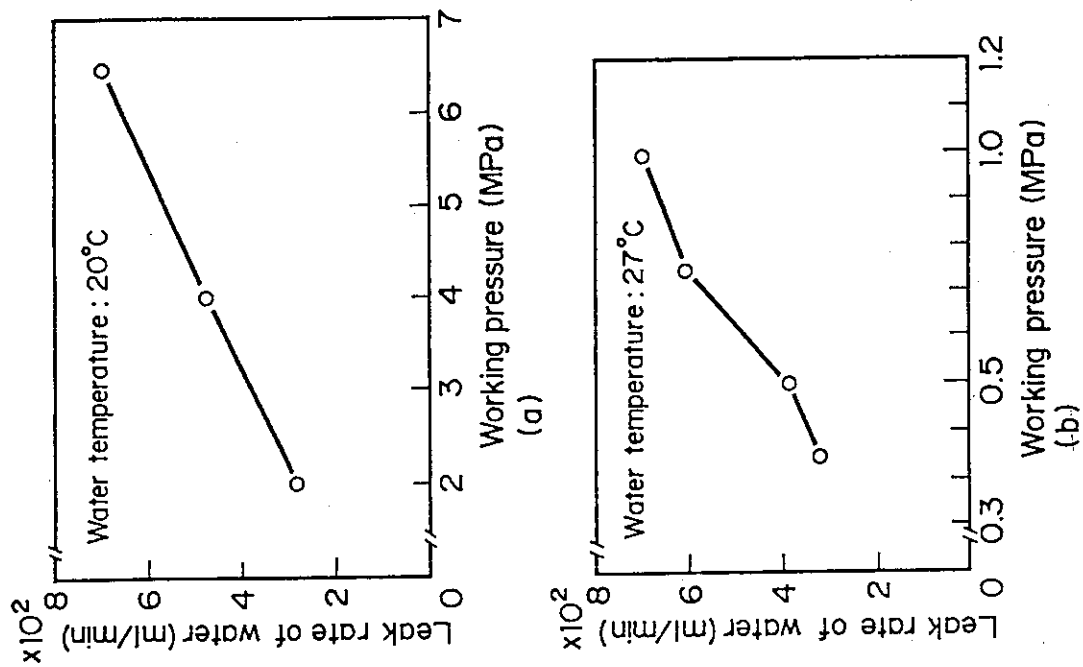


Fig. 6.5 Leak rate of water through pressure ring of cylinder, (a): locking jack, (b): lifting jack

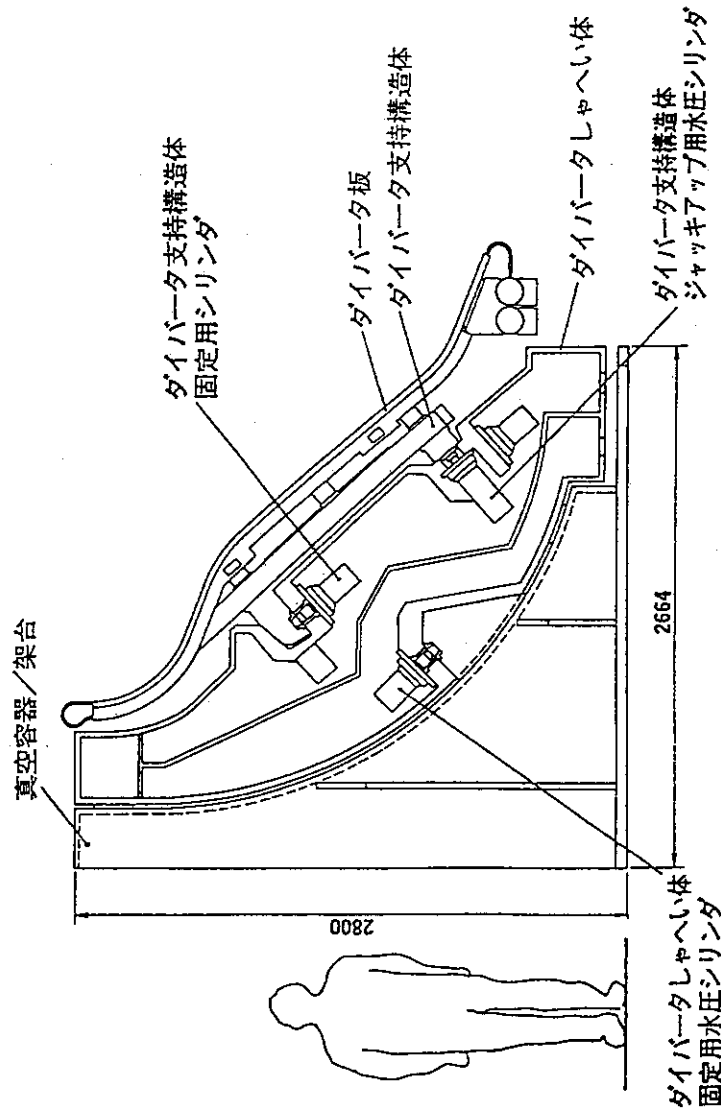


Fig. 6.6 Real scale diverter support structure

7. まとめと今後の課題

核融合実験炉ITERのダイバータ支持棒の概念設計を行った。本ダイバータ支持棒は、

- (1) 電気絶縁を施し、ディスラプション時に発生する電磁力に耐える構造にしたこと。
- (2) ダイバータ遮蔽体の体積を増やして、ダイバータ支持棒のガイドに用いると同時に、遮蔽性能を向上したこと。
- (3) ダイバータ交換用の脱着機能を取り入れたこと。
- (4) ダイバータ支持棒の冷却には、支持棒内に直接冷却材を流し込む構造にして、冷却性能を向上したこと、に特徴を持つ。

今後の課題を以下に示す。

- (5) 冷却機能を達成するための対策が施されていないものに、ダイバータの崩壊熱除去がある。

これは、ブランケット、第一壁、遮蔽体は一体構造がとれ、お互いに接し合っているので、1系統が故障しても隣接している他の系統が健全であれば崩壊熱は除去できるが、ダイバータは独立した系統なので上記のような考えが成立しないからである。

そこで、ダイバータの崩壊熱除去対策として、次の2つを考えた。

(i) 低温ヘリウムガスによるダイバータの冷却

(ii) ダイバータ下部の遮蔽体への熱伝達・輻射によるダイバータを冷却

(i) は低温ヘリウムガスを真空容器内に循環させて、ダイバータを冷却する方法である。崩壊熱を $q''' = 0.1 \text{ MW/m}^3$ 、発熱体積を $V = 10^3 \text{ m}^3$ とすると発熱量は $Q = q''' \cdot V = 1 \text{ MW}$ である。 -180°C ヘリウムガスが常温になるまでを考える。常温でのヘリウムのプラントル数、動粘性係数は、それぞれ、 $Pr = 0.7$ 、 $\nu = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ である。例えば、 -180°C のヘリウムガスを 1.3 m/s で真空容器内に流すと、ヘリウムガスは 20°C になり、ダイバータ板は 290°C を保つことがわかる。

(ii) はダイバータ板を、ダイバータ下部の遮蔽体（冷却水温度 100°C ）との接触面積を増やして熱伝達で冷やす方法である。合せて、ダイバータ板から上記遮蔽体への熱輻射も利用する。崩壊熱を (i) と同じ $q''' = 0.1 \text{ MW/m}^3$ とする。熱輻射の放射率を $\varepsilon = 0.5$ とすると、ダイバータ板は 223°C なる。

(i) は真空容器内に新たな設備を持ち込むことになるので、(ii) が有効であれば (ii) を採用したいが、今後の課題である。

- (6) 水圧コッタの設備空間に限りがあることから、水圧コッタの小型化、ないしは、全く別の脱着法の開発が必要である。または、水圧コッタの設置場所の工夫が必要である。
- (7) ダイバータ表面位置を 0.1 mm の精度で合せる構造・構成の開発が必要である。

謝 辞

本検討を実施するに当り、ITER開発室、炉構造研究室、核融合炉システム研究室の方々から技術的に有益な議論を頂いたことに感謝致します。

また、本検討を実施するに当り、吉川允二理事、鹿園直基所長、島本 進核融合工学部部長、松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダーから多くの御支援と御助言を頂いたことに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Kuroda, et al., ITER Plasma Facing Components, ITER Documentation Series, No.30, IAEA, Vienna, 1991.
- 2) D. Smith, et al., USA Contribution to the homework for ITER Plasma Facing Components, Garching, 1989.
- 3) A. Cardella, et al., ITER-IL-PC- 8-0-7, Garching, 1990.
- 4) D. E. Post, et al., ITER Physics, ITER Documentation Series No.21, IAEA, Vienna, 1991.
- 5) S. Zimin, et al., JAERI-M レポート, JAERI-M 92-063, 日本原子力研究所, 1992.

謝 辞

本検討を実施するに当り、ITER開発室、炉構造研究室、核融合炉システム研究室の方々から技術的に有益な議論を頂いたことに感謝致します。

また、本検討を実施するに当り、吉川允二理事、鹿園直基所長、島本 進核融合工学部部長松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダーから多くの御支援と御助言を頂いたことに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Kuroda, et al., ITER Plasma Facing Components, ITER Documentation Series, No.30, IAEA, Vienna, 1991.
- 2) D. Smith, et al., USA Contribution to the homework for ITER Plasma Facing Components, Garching, 1989.
- 3) A. Cardella, et al., ITER-IL-PC- 8-0-7, Garching, 1990.
- 4) D. E. Post, et al., ITER Physics, ITER Documentation Series No.21, IAEA, Vienna, 1991.
- 5) S. Zimin, et al., JAERI-M レポート, JAERI-M 92-063, 日本原子力研究所, 1992.