

JAERI-M
89-084

第1壁の簡易交換に関する調査

1989年7月

立川 克浩・堀江 知義・関 泰
藤沢 登・近藤 光昇^{*}・内田 高穂^{*}

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

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, Tokaimura,
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

第1壁の簡易交換に関する調査

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

立川克浩・堀江知義⁺・関 泰

藤沢 登・近藤光昇^{*}・内田高穂^{*}

(1989 年 6 月 8 日受理)

核融合炉の次期大型装置では、D-T反応を計画している。D-T反応では、14 MeV の核融合中性子が発生し、炉内を放射化するばかりでなく、第1壁の健全性に多大な影響を及ぼすことが予期されている。したがって、第1壁の迅速な簡易交換のための遠隔操作技術は核融合炉においては、重要な技術課題のひとつである。

また、遠隔操作技術は炉本体構造と密接な関係があり、両者の整合性を十分に考慮する必要がある。本調査報告は、上記事項に鑑み、従来から提案されてきた第1壁アーマタイルの構造、特性及び交換方法などを調査した。調査の重点は、形状記憶合金（SMA）など容易かつ迅速に交換可能なタイル構造を検討するとともに、タイルの健全性点検とタイル交換に必要なシステム概念の検討に絞った。また、これらの検討はさらに深度をたかめるため、今後も継続する必要性とともに、適時部分的なR&Dを通してこれらの概念の検証を行う必要がある。

本報告書は、昭和63年度に行われた「第1壁の健全性評価法と簡易交換法に関する調査第II編」（委託調査）の結果をまとめたものである。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ 核融合実験炉特別チーム

* 東芝（株）

Quick Installation/Removal Technology for First Wall

Katsuhiro TACHIKAWA, Tomoyoshi HORIE⁺, Yasushi SEKI
Noboru FUJISAWA, Mitsunori KONDOH^{*} and Takao UCHIDA^{*}

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

(Received June 8, 1989)

Fusion Next Step Device (FER) plans to experiment Deutrium-Tritium (D-T) reaction, remote handling and other fusion engineering issues. The fast neutron of 14 MeV caused by D-T reaction does not only activate the structural components inside the vacuum vessel, but also damages some first walls.

The technique to remove the armour tiles of first walls by simple and quick operation is a key technology for the D-T burning Next Step Device.

To establish the rational remote tile handling technology, consideration of consistency between the reactor structure and remote equipments should be made.

The report comprises mainly the joint structures of armour tiles, design conditions (electro-magnetic force, cooling systems and so forth) and remote equipments. In addition, it is referred to shape memory alloy (SMA) applications, transportation of damaged tiles from the vacuum vessel and inspection systems for the first wall integrity.

Hereafter, furthermore study in depth for the tile handling must be made in parallel with verification of remote systems and tile attachment structures using partial mockups.

The work was made by an investigation contract of JAERI with Toshiba Corporation in fiscal year 1988.

+ Fusion Experimental Reactor Team

* Toshiba Corp.

Keywords: First Wall, Armour Tile, Electro-magnetic Force,
Cooling System, Articulated Arm, Shape Memory Alloy,
Inspection System, Transportation System, Mockup

目 次

1.はじめに.....	1
2.第1壁アーマータイル交換の既存技術の調査.....	2
2.1 アーマータイル交換法.....	2
2.1.1 J E T	2
2.1.2 T F T R	2
2.1.3 F E R	2
2.2 アーマータイル構造設計例.....	2
3.形状記憶合金の応用に関する既存技術の調査.....	15
3.1 形状記憶合金の核融合炉への適用.....	15
3.1.1 S M A 配管継手.....	15
3.1.2 C字型コネクタ.....	16
3.1.3 S M A ジャッキシステム.....	16
3.1.4 S M A のレーザ溶接による接合.....	16
3.2 形状記憶合金の中性子照射による影響.....	16
4.ディスラプションによるタイルの影響.....	22
4.1 熱的影響.....	22
4.1.1 通常運転時の温度上昇.....	22
4.1.2 ディスラプション時の温度上昇.....	23
4.2 ディスラプション時の電磁力、強度検討.....	24
5.アーマータイル取付の新手法.....	34
5.1 S M A 適用構造.....	34
5.2 クイック取付構造.....	35
5.3 アーマ取付ボルト冷却構造.....	35
6.タイル交換に必要なシステム.....	44
6.1 システムの分類.....	44
6.2 タイル交換システムの概念.....	45
7.壁の健全性点検法.....	55
8.まとめ.....	55
参考文献.....	56
付 錄.....	57

Contents

1. Introduction	1
2. Existing technologies for the armour tile handling	2
2.1 Tile handling designs	2
2.1.1 JET	2
2.1.2 TFTR	2
2.1.3 FER	2
2.2 Structural designs for armour tiles	2
3. Applications of Shape Memory Alloy (SMA)	15
3.1 SMA applications for fusion reactor	15
3.1.1 Pipe fitting	15
3.1.2 "C-shaped" connector	16
3.1.3 SMA jack system	16
3.1.4 Laser beam welding for SMA	16
3.2 Neutron irradiation effects for SMA	16
4. Effects for armour tiles caused by plasma disruption.....	22
4.1 Thermal effects	22
4.1.1 Temperature elevated during normal operation	22
4.1.2 Temperature elevated by plasma disruption	23
4.2 Analysis of electro-magnetic force and strength of materials during plasma disruption	24
5. New methods of armour tile attachments on first wall	34
5.1 SMA tile attachments	34
5.2 Mechanically quick tile attachments	35
5.3 Cooling system structures for stud bolts of tile attachment .	35
6. Systems and equipments required for tile handling	44
6.1 System classifications	44
6.2 Concepts of tile handling systems	45
7. Inspections for integrity of first wall	55
8. Conclusions	55
References	56
Appendices Detail of armour tile designs	57

1. はじめに

JET や TFTR は 1990 年代初頭に D-T 反応を計画している。D-T 反応では 14 MeV の核融合炉中性子が発生し、炉内を放射化するばかりでなく、第 1 壁の健全性に多大な影響を及ぼすことが予期されている。従って JET や TFTR では装置の建設段階から炉内コンポーネント、特に第 1 壁が損傷した場合のその対策を遠隔操作技術をベースに研究開発してきた。そしてこれら JET, TFTR では損傷した第 1 壁を修理する方法として、第 1 壁を多数のアーマータイルで貼り巡らし、損傷したタイルのみをスペアと交換する方式を採用しようとしている。また、そのための遠隔操作技術として多関節ブームを開発した。

一方、国内では JT-60 が D-T 反応を実施しないので、この分野では特に EC と比べて遅れていることは否めない。しかし、核融合実験炉 (FER) では必須の技術であり今後、急ピッチで研究開発をする必要がある。また、遠隔操作技術は炉本体構造と密接な関係があり、両者の整合性を十分に考慮しなければならない。本調査報告は、上記課題を鑑み、従来提案された第 1 壁アーマータイルの構造、特性及び交換方法等を調査した。そして、容易かつ迅速に交換可能なタイル構造を検討するとともに、タイルの健全性点検とタイル交換に必要なシステムの概念を検討した。また、今回のこれら検討は今後さらに検討し、部分的な R&D を通じて検証した方が望ましい。

2. 第1壁アーマータイル交換の既存技術の調査

2.1 アーマータイル交換法

2.1.1 J E T

J E T では第1壁が損傷した場合の具体的な手法は示されていない。しかし、Table 2.1.1⁽¹⁾ に示すように RF アンテナタイルと第1壁タイル (1 m^2) の交換が D-T オペレーション中に2回は必要としているがその詳細は不明である。Fig. 2.1.1⁽²⁾ に J E T で開発された多関節ブームの先端に装着される種々のエンドエフェクタが示されている。図中にタイル・ハンドリング・ツールやボルト・レンチが示されているものでアーマータイルをプラズマ対向面側からボルトを着脱して交換されるものと思われる (Fig. 2.1.2 参照)⁽³⁾。

2.1.2 T F T R⁽⁴⁾

T F T R は Fig. 2.1.3 に示すように約 1000 枚の第1壁アーマータイルを備えている。T F T R は現在、D-D 運転で、炉停止時の真空容器内の γ 線線量率は 3 mR/h なので、タイル交換は Hands-on によってなされている (P P P L の被曝限度に関するガイドラインによると $600 \text{ mR}/\text{QTR} \cdot \text{YR}$ 以下)。1991 年より開始される D-T 運転では、真空容器内は 10 ショット終了後 8 時間で 30 R/h のレベルとなる。従って、D-T オペレーション時になると、Hands-on の代わりに Fig. 2.1.4 に示す多関節ブームを利用してタイル交換がなされる。

2.1.3 F E R⁽⁵⁾

J E T, T F T R に相当する J E -60 は、D-T オペレーションを行わないで、ここでは核融合実験炉 (F E R) で概念検討されたものを示す。Fig. 2.1.5 は F E R の炉構造のオプションの 1 つである M I N I 炉で検討された第1壁タイルの交換概念を示す。グラファイト製のアーマータイル ($150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) は、第1壁ベースプレートにグラファイトボルトにより固定されている (Fig. 2.1.6)。アーマータイルの交換は、双腕マニピュレータ先端にタイル把持ツールとインパクトレンチによってなされる。

2.2 アーマータイル構造設計例⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾

今まで内外で設計・検討された機械的接続第1壁アーマー構造の代表的なものを Table 2.2.1(1)~(7) に示す。各構造は用途、熱負荷、運転条件、メンテナンス条件等仕様が異なるが構造として参考になる点が多い。

第1壁アーマーの構造・特性としては、次に挙げた項目がそれぞれ炉仕様、構造に適合していることが必要である。

1) 冷却特性 (アーマー及び冷却基板の温度分布)

- 2) 損耗量
- 3) 機械的強度
- 4) 交換作業性
- 5) 製作性
- 6) 炉運転に対する柔軟性

機械的接続第1壁アーマー構造の場合、このうち特に問題となるのは冷却特性と交換作業性である。

Table 2.1.1 Anticipated in-vessel tasks.

- A) Expected normal: (occurs twice in D-T phase)
 - Replacement of window in circular port
 - Replacement of RF antenna tiles
 - Replacement of 1M² first wall tiles
- B) Likely worst case: (any one in D-T phase)
 - Replacement of belt limiter feedthrough bellows
 - Replacement of one antennae screen
 - Detection of leak in vacuum vessel
- C) Conceivable worst case: (not expected)
 - Recover failed articulated boom

Table 2.2.1 First wall designs (1)

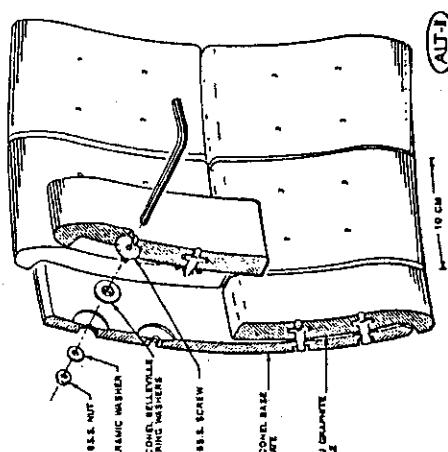
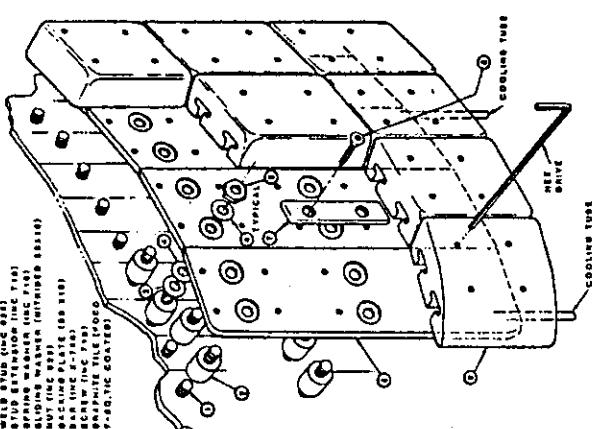
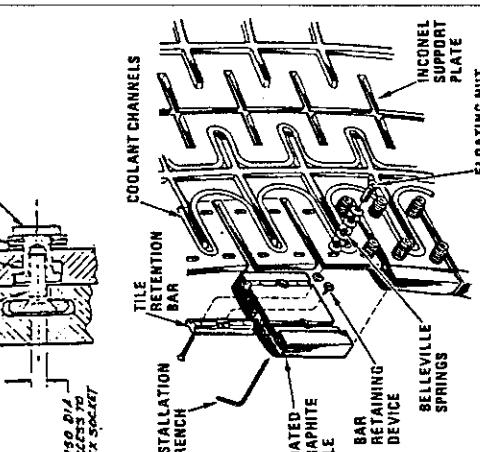
項目 No	装置名	1. T FTR	2. D - III	3. ALT - II
用途	バーンバー リミタ	N B I アーマー リミタ		
熱負荷 (MW/m ²)	4.2			
燃焼時間 (sec)	0.5			
材質 (アーマー) (ヒートシンク)	グラファイト (表面コーティング)	グラファイト (TiC コーティング)	グラファイト	
" "(支持部材)	インコネル	SUS 316	インコネル	
" "(アーマー形状・寸法)	矩形	矩形	矩形 100 mm	
支持構造	リテーナとボルト (スプリング併用) 2点支持	リテーナとボルト, 4点支持	ボルト 4点支持	
冷却方式	伝導	伝導	伝導	
分解修理方式	接近作業	接近作業	接近作業	
				

Table 2.2.1 First wall designs (2)

Table 2.2.1 First wall designs (3)

Table 2.2.1 First wall designs (4)

項目	No.装置名	8. CIM 真空容器用アーマー	9-1. CIT 真空容器用アーマー	9-2. CIT ダイバー
用途	熱負荷 (MW/m ²)	11	11	9.5
	燃焼時間 (sec)	3	3	3
材質	(アーマー) (ヒートシング) (支持部材)	グラファイト グラファイト (Poco) S.S	グラファイト S.S	グラファイト
") S.S
アーマー形状・寸法		円形, $\phi 80 \times 10\text{mm}$	円形, $\phi 80 \times 10\text{mm}$	スタッドボルト及びグラファイトナット
支持構造		輻射	輻射	スタッドボルト及びグラファイトナット
冷却方式		引抜後	引抜後	輻射 / V.V 冷却
分解修理方式		修理	修理	In-Situ, マニピュレータ

Table 2.2.1 First wall designs (5)

項目	No. 装置名	9 - 3 CIT	10 - 1 FER
用途	真空容器用アーマー	真空容器用アーマー	
熱負荷 (MW/m ²)	11	1.0	
燃焼時間 (sec)	3	800	
材質 (アーマー)	グラファイト	グラファイト	
" (ヒートシンク)			
" (支持部材)	インコネル 625	S.S.	
アーマー形状・寸法	矩形	ローペ + ダブティル (2層構造)	
支持構造	スタッドボルト及びC.Cコンポジット	輻射	
冷却方式	輻射	輻射	
分解修理方式	In-Situ	In-Situ	

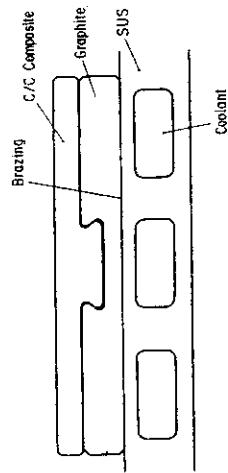
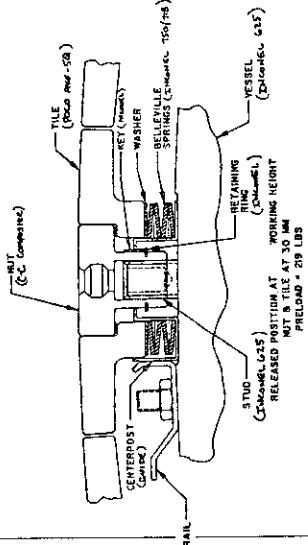


Table 2.2.1 First wall designs (6)

項目	No	装置名	10-2 FER	10-3 FER
用途		真空容器用アーマー		仕様は左記に同じ
熱負荷	(MW/m ²)	1.0		セラミック取付座使用
燃焼時間	(sec)	800		セラミックの座にセラミックの取付ナット接続
材質	(アーマー)	グラファイト		
"	(ヒートシンク)	S, S		
"	(支持部材)			
アーマー形状・寸法		ボルト, ナット (2層構造) 輻射	In-Situ	取付座を含めて分解 (タイル4個をボルト④で支持)
支持構造				
冷却方式				
分解修理方式				

Table 2.2.1 First wall designs (7)

項目 No.	装置名	10-4 FER
用途	真空容器用アーマー	
熱負荷 (MW/m ²)	1.0	
燃焼時間 (sec)	800	
材質 (アーマー)	グラファイト	SUS レール
" (ヒートシング)		
" (支持部材)		S.S
アーマー形状・寸法		
支持構造	レール使用	
冷却方式	輻射	In-Situ
分解修理方式		
		レールにクリップレールの蓋をする。
		レールの長手方向にテーパーを設け位置決めする。
		セラミックのレール座
		レールの長手方向にテ
		ーパーを設け位置決め
		する。

The technical drawings illustrate three methods for supporting rails. The first drawing shows a cross-section where a rail is held by a graphite armature. The second drawing shows a side view of a rail being held by a graphite armature and a ceramic sleeve. The third drawing shows a top-down view of a rail being held by a graphite armature and a ceramic sleeve. Labels include: Rail attachment bolt (Graphite), Graphite armour, Guide rail, Ceramic sleeve (Ceramic), Rail attachment bolt (Graphite), Graphite armour, Guide rail, Ceramic sleeve (Ceramic), Rail attachment bolt (Graphite), Graphite armour, Guide rail, Ceramic sleeve (Ceramic), Rail attachment bolt (Graphite), Graphite armour, Guide rail, Ceramic sleeve (Ceramic).

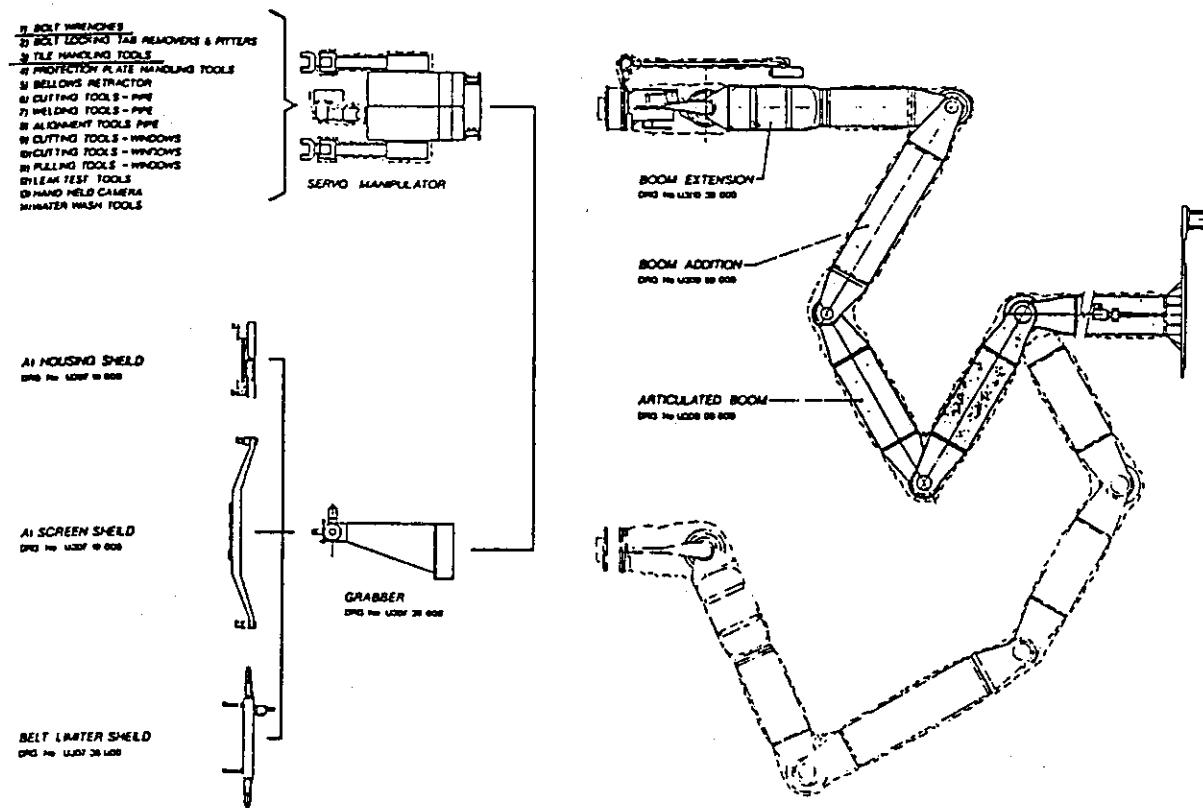


Fig. 2.1.1 Articulated boom and end effectors.

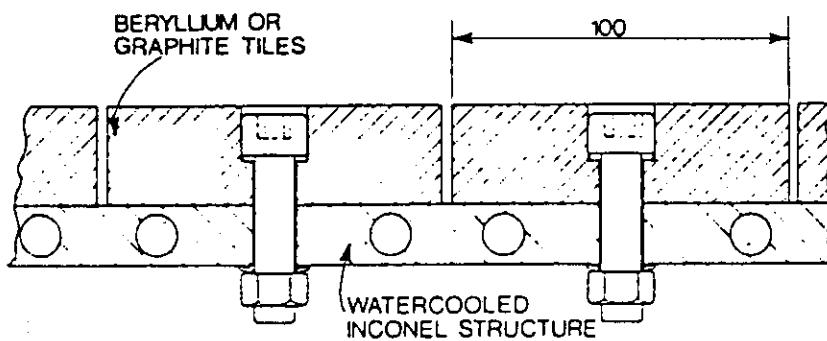


Fig. 2.1.2 Schematic diagram of separatrix dump plates.

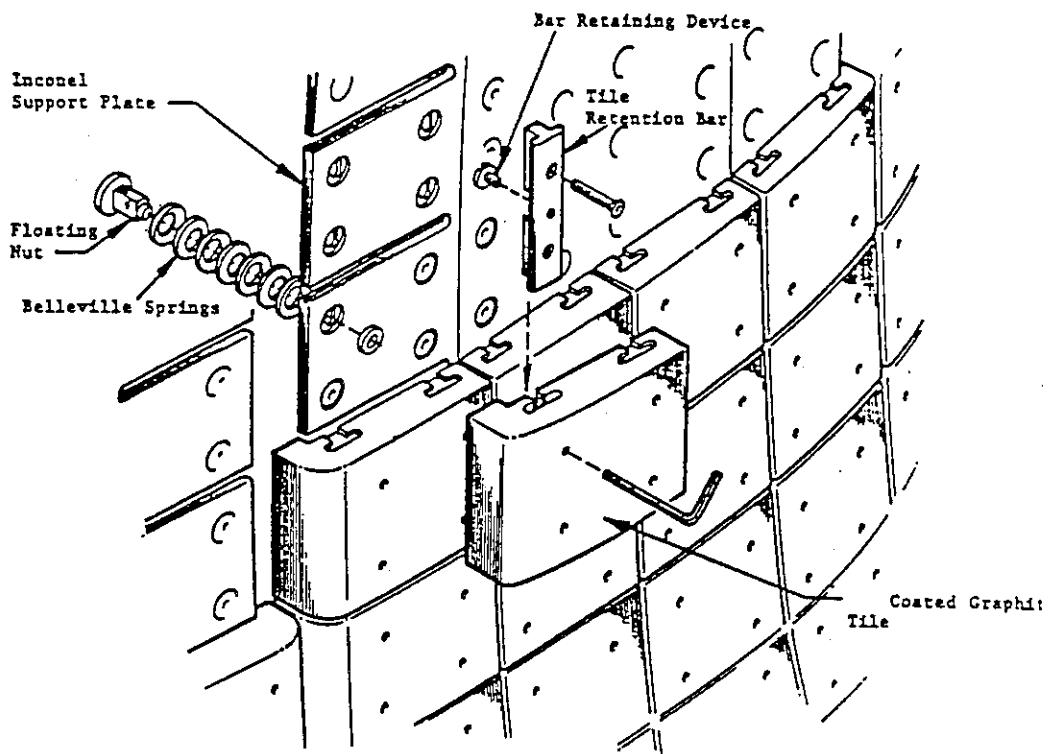


Fig. 2.1.3 TFTR carbon tile mounting details.

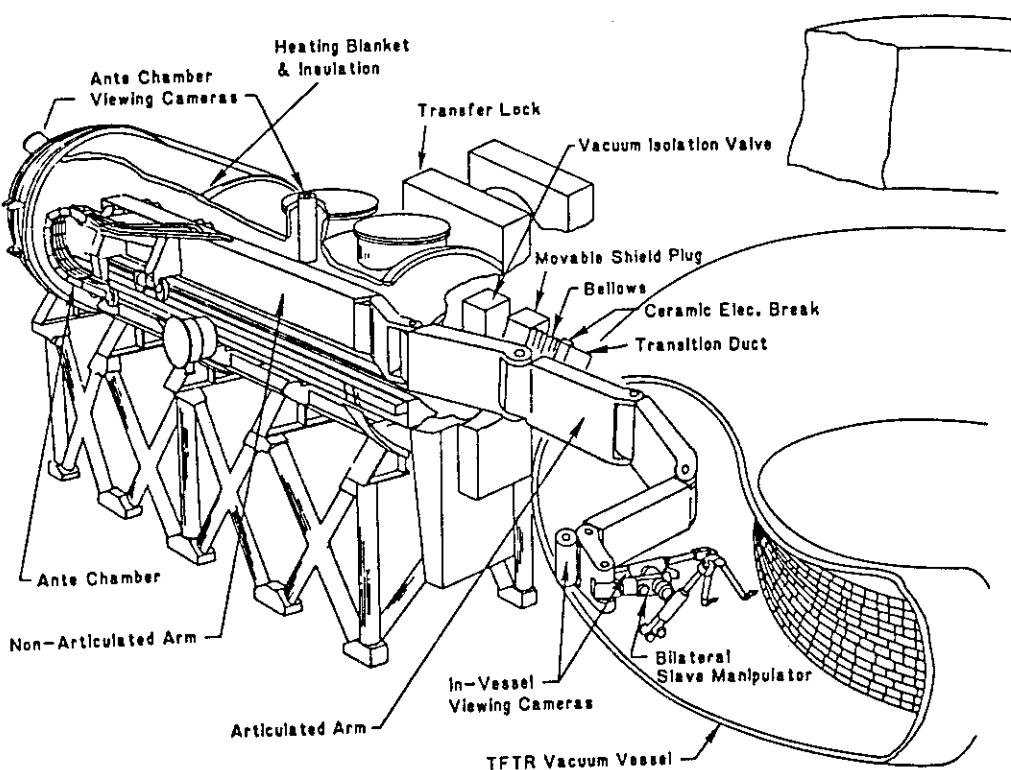


Fig. 2.1.4 TFTR articulated arm.

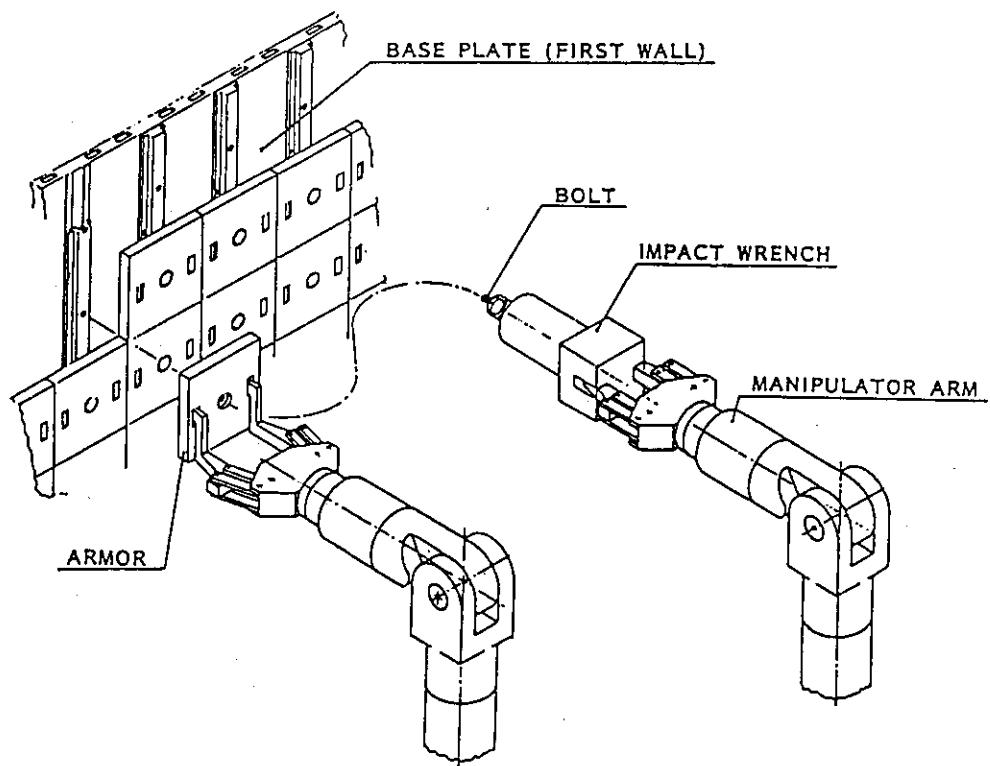


Fig. 2.1.5 Attachment of armor tile.

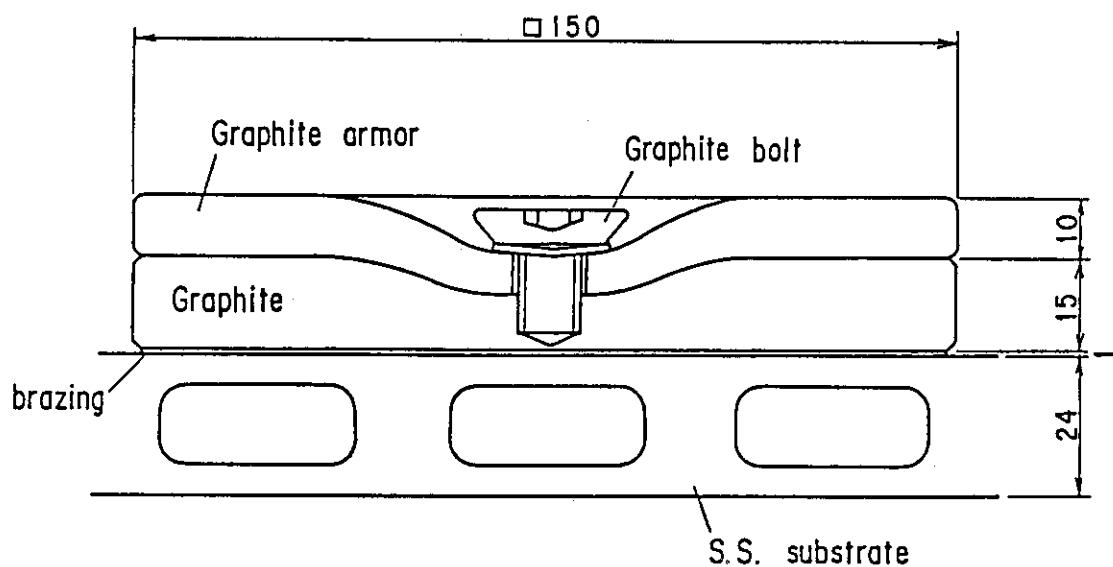


Fig. 2.1.6 Mechanically Attached armor of MINI

3. 形状記憶合金の応用に関する既存技術の調査

第1壁を迅速かつ容易に交換する手法の1つに形状記憶合金の形状記憶特性を応用することが考えられる。すなわち、第1壁タイルの固定部に形状記憶合金を利用し、形状記憶合金を加熱・冷却するだけで第1壁タイルを着脱できる可能性があるからである。しかし、既存装置の第1壁タイル部に形状記憶合金を適用した例はなく、またD-T反応時の14 MeV 中性子照射の影響も無視できない。

ここでは、形状記憶合金の核融合炉への適用のために東芝が試作・実験を行った配管継手、C字型コネクタ、SMAシステムほかについて、その概要を示し、日本原子力研究所の大洗研究所で実施された形状記憶合金の中性子照射の結果について報告する。

3.1 形状記憶合金の核融合炉への適用⁽¹¹⁾

Fig. 3.1.1に試作・実験した形状記憶合金応用例を示す。SMA配管継手は、従来の配管溶接・切断の代わりに、C字型コネクタは従来のボルト締結の代わりに、SMAジャッキシステムは比較的軽量な核融合炉コンポーネントの持ち上げに、そして真空リップシール溶接・切断の代わりにSMAメタルOリングにそれぞれ適用される。なお、形状記憶合金はすべてNi-Ti合金である。

3.1.1 SMA配管継手

形状記憶合金を適用した配管継手のうちスリープ型については、例えば西川ら⁽¹²⁾によって既に報告されているので、ここではフランジ型の配管継手について記述する。Fig. 3.1.2に試作したフランジ型配管継手を示す。2方向性の形状記憶合金ボルトをフランジ周方向に12本配列してフランジ締めを行う。使用された形状記憶合金ボルトはM 6 × ℓ 50 mmで45 °C以上に加熱するとボルト長が1.3%収縮し、-10 °C以下に冷却するとボルト長は元に戻るようになっている。なお、加熱時の形状記憶合金ボルトの最大回復力は2 × 10³ Nである。Fig. 3.1.3は形状記憶合金ボルトを加熱・冷却したときのフランジ締結部の挙動を示す。フランジ締結時はまず、形状記憶合金ボルトを0 °C近傍に冷却保持した後、フランジ部に装着し、手でナットを締められなくなるまで締める（トルクレンチは不要である）。

次に加熱するとボルトは収縮し、約80 °Cでフランジ締結は完了する。その後は、図から示すように-15 °C以上にボルト温度を保持しておればフランジ締結は維持される。また、この状態では、形状記憶合金ボルトとナットのネジピッチの違いにより、フランジはセルフロックされた状態となり、従来のボルト締結の欠点の1つであるネジの緩みはない。逆にフランジをはずす場合は形状記憶合金ボルトを-30 °C程度まで冷却すれば容易にはずれる。

フランジ締結後のHeリークテストでは 1×10^{-7} Pa · ℓ/secまでリークは検知されなかった。

3.1.2 C字型コネクタ

Fig. 3.1.4にC字型コネクタの概要を示す。対向した2つのC字型の板を複数の形状記憶合金ボルトで連結した構造で、形状記憶合金ボルトの軸方向の収縮力をC字型の板の端部に伝える。実験に使用した形状記憶合金ボルトはM 6 × ℓ 84mmで、-15 °C以上に加熱すると形状記憶合金ボルトは収縮する。Fig. 3.1.5は8本の形状記憶合金ボルトの予歪を変化させて締結力の変化を測定した結果である。

実験では最大約1%しか予歪を与えていないが、5-6%まで予歪を与えることが可能で、予歪に比例して締結力を更に高めることは可能である。

3.1.3 SMA ジャッキシステム

Fig. 3.1.6にSMA ジャッキシステムの概要を示す。一対のウェッジと形状記憶合金ボルトを使用して形状記憶合金の収縮力とウェッジ効果により拡大したジャッキ力を得る。形状記憶合金ボルトはM 12 × ℓ 240 mmで30 °C以上に加熱すると形状記憶合金ボルトは収縮する。Fig. 3.1.7は予歪を1%に設定し、ウェッジ摩擦面の潤滑剤をパラメータにジャッキ力を測定した結果である。なお、このジャッキシステムはC字型コネクタの代わりに、機械的締結にも応用できる。

3.1.4 SMA のレーザ溶接による接合

SMA メタルOリングを製作するには形状記憶合金ワイヤの両端を接合し、その接合部においても、接合部以外の場所と同じ形状記憶特性、強度を必要とする。

溶加剤として異種金属が使用不可能、接合熱サイクルにともなう各種金属間化合物の析出の制御、接合部近傍への熱影響の抑制等を考慮することが接合に必要である。近藤、内田らは局所的にエネルギーを投与し、溶融金属の凝固速度を高めることが出来るレーザービーム溶接を採用し、各種特性を調べた。Fig. 3.1.8は実験結果の一部で形状記憶合金の0.5%耐力と各試験温度の関係を400 °Cの下で1 h 時効処理したものと比較している。図より両者の特性がほとんど変わらないことが判る。

3.2 形状記憶合金の中性子照射による影響⁽¹³⁾

星屋らは日本原子力研究所J M T RによってNi-Ti 合金の中性子照射の影響を調べている。フルエンスが $8 \times 10^{23} n/m^2$ の速中性子(0.1 MeV)を50 °CでNi-Tiに照射し、照射特性を調べている。結果は、1) Ti-Ni 合金の変態点は照射により液体窒素温度以下に低下する、2) 破断応力及び破断歪は大きく変化し、1300-1700 MPa、6-8%を示す、3) 形状記憶効果は照射により示さなくなつたが、250 °C以上の照射後焼鈍処理で回復することが示された。

例えばF E Rにおいて遮蔽体の外側での中性子フラックスは、14 MeVは $1 \times 10^4 n/cm^2$ で、0.1 MeVは $1 \times 10^6 n/cm^2$ である。炉の寿命を3年(10^8 秒)と仮定すると速中性子による照射の影響は遮蔽体の外側では問題ない。また、形状記憶合金温度が250 °C以上に保持されれば遮蔽体の内側でも使用可能などを示す。

しかし、14 MeVの核融合中性子による照射に関するデータがないのが現状であり、既存のデ

ータベースからは、形状記憶合金の応用が可能かどうかの判断はできない。今後、14 MeV の中性子照射の実験が必要である。

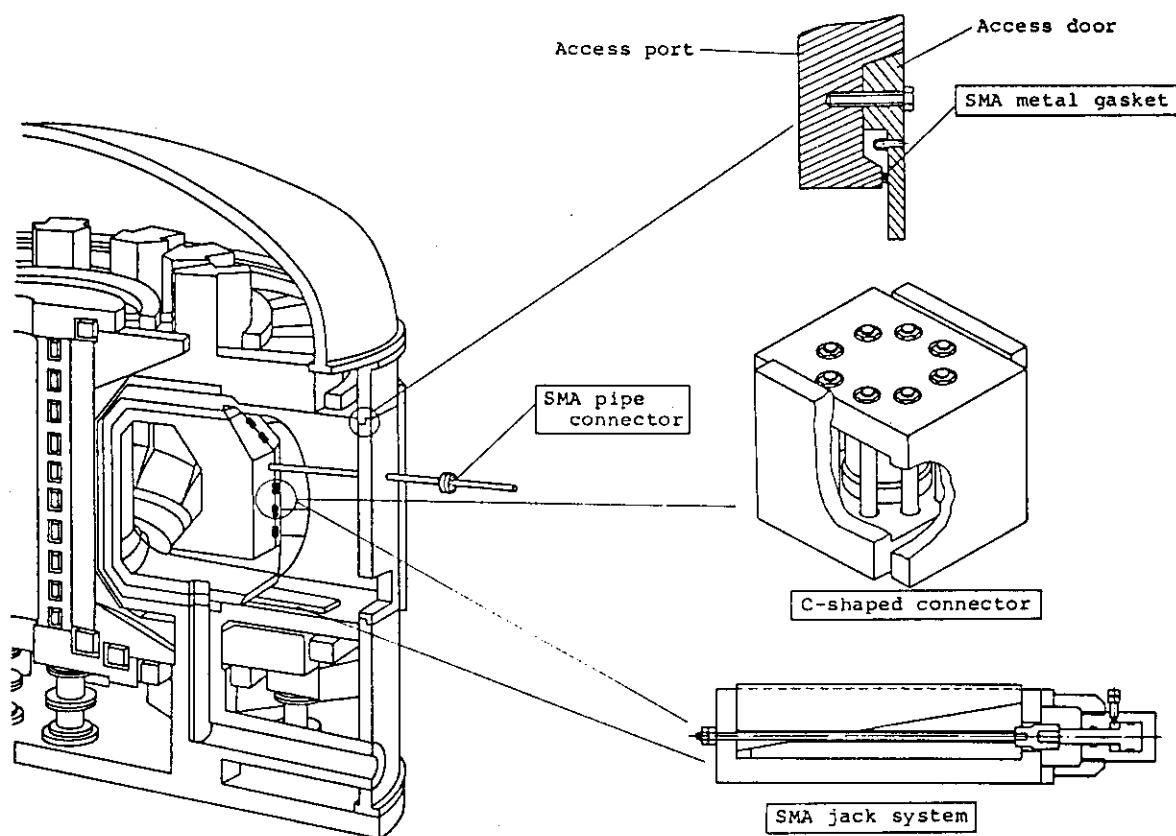


Fig. 3.1.1 SMA application in fusion reactors.

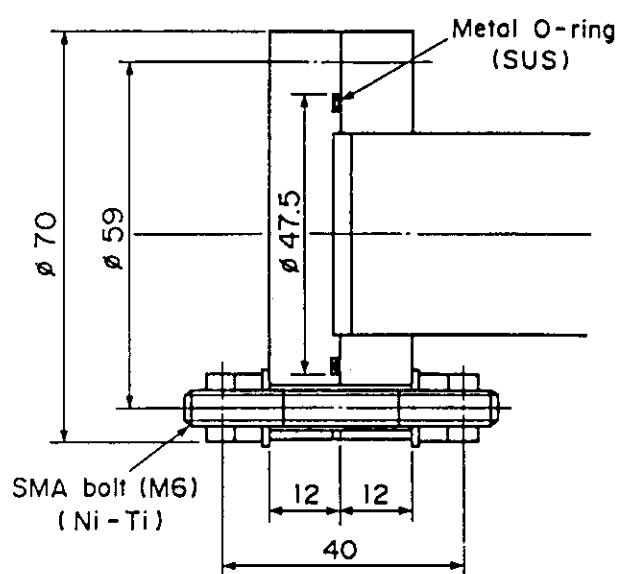


Fig. 3.1.2 Flange-type SMA connector.

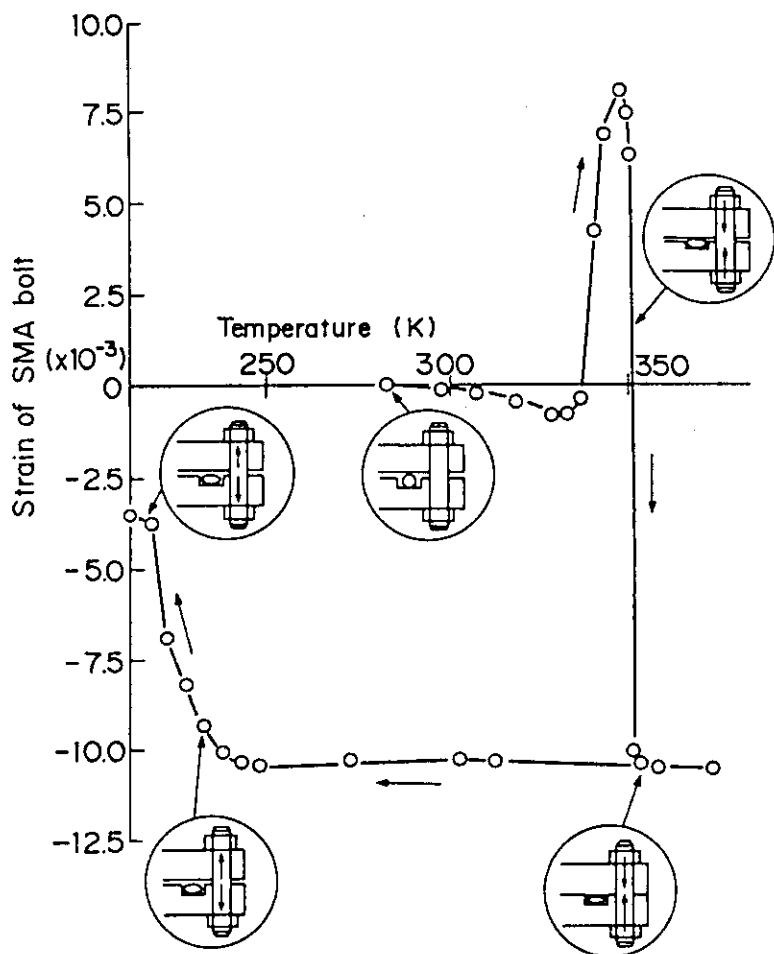


Fig. 3.1.3 Changes in the SMA bolt strain due to heating and cooling.

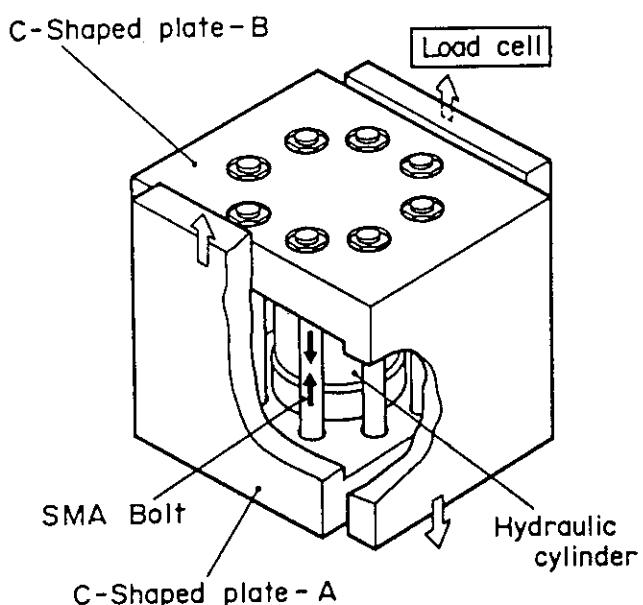


Fig. 3.1.4 C-shaped connector.

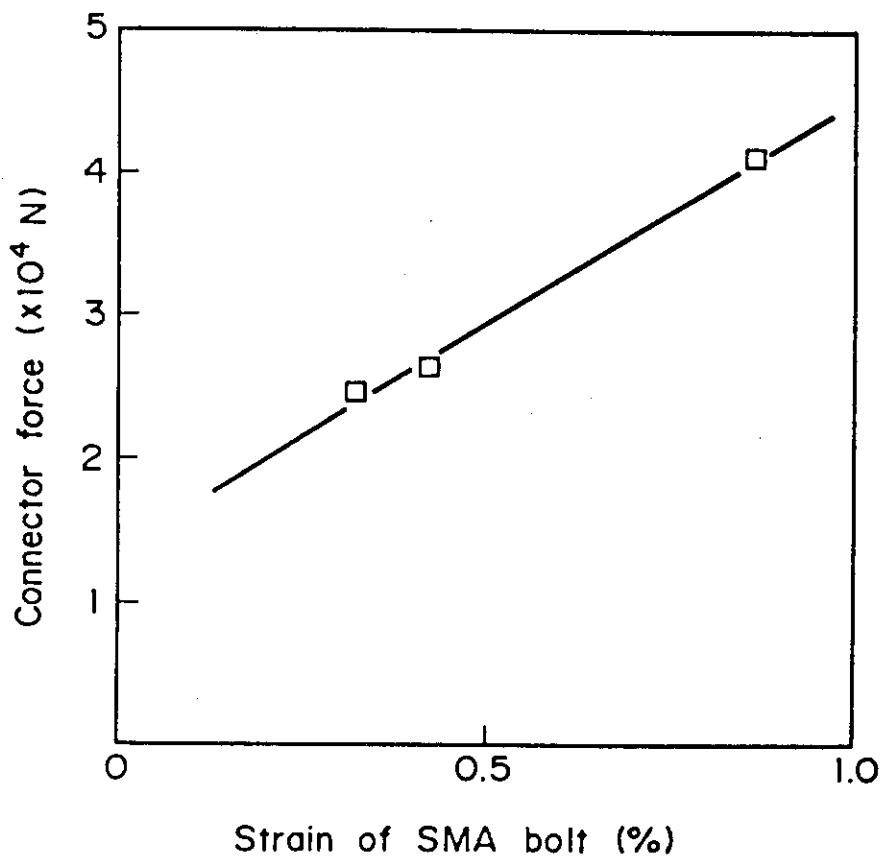


Fig. 3.1.5 C-shaped connector force vs SMA bolt given strain.
(Eight SMA bolts are used.)

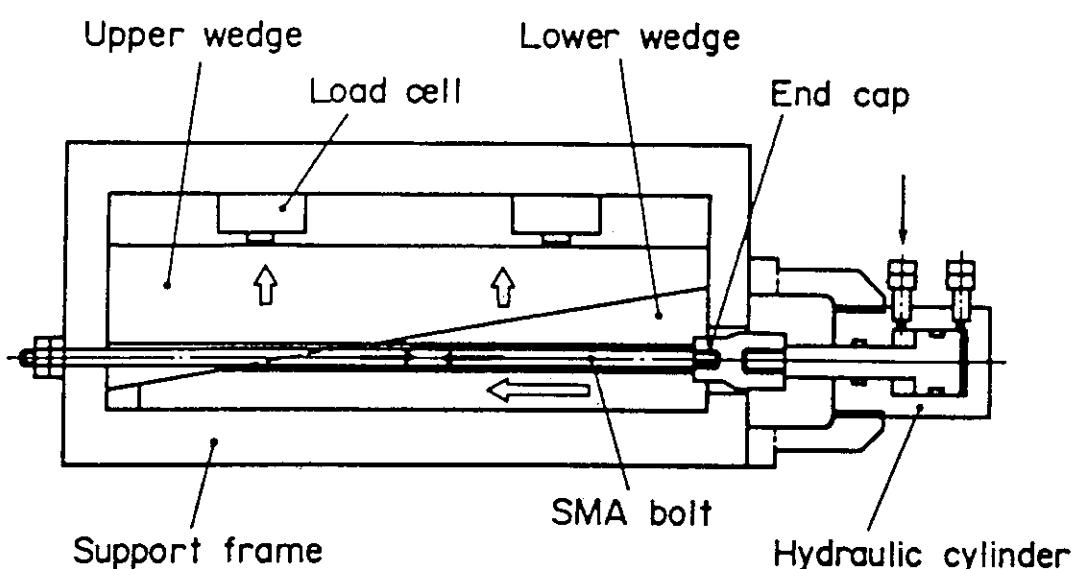


Fig. 3.1.6 Structure of the SMA jack system.

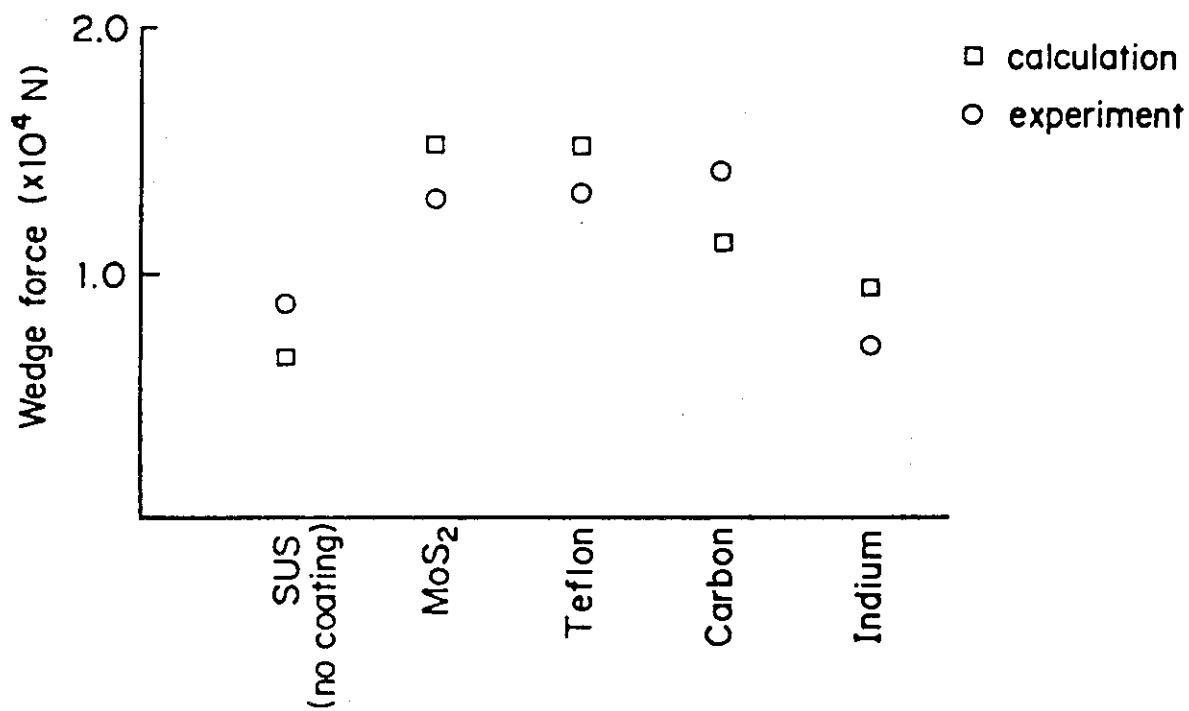


Fig. 3.1.7 Wedge force for several surface treatments at a 1.0 % SMA bolt given strain.

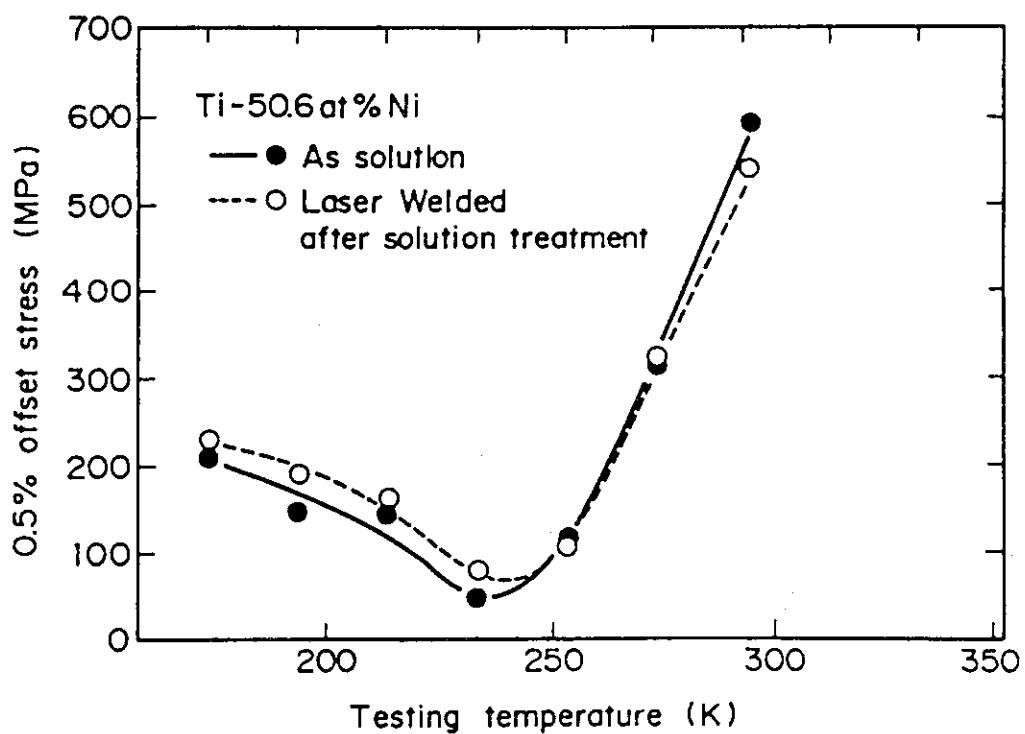


Fig. 3.1.8 0.5 % offset stress vs testing temperature.

4. ディスラプションによるタイルの影響

4.1 热的影響

4.1.1 通常運転時の温度上昇

通常運転時の第1壁アーマータイルの温度上昇について検討した。

(1) 計算条件

- $Q = 0.1 \sim 1.0 \text{ (MW/m}^2\text{)}$
- 第1壁材料

グラファイト 热伝導率 : $\lambda = 30 \text{ (W/M}\cdot\text{C)}$

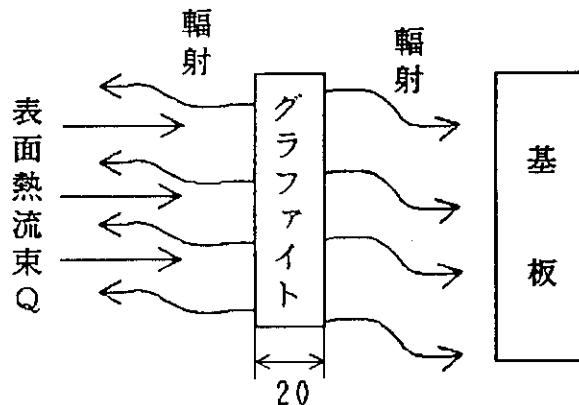
輻射率 : $\epsilon_1 = 0.8$

厚さ : $t = 20 \text{ (mm)}$

(2) 热解析モデル

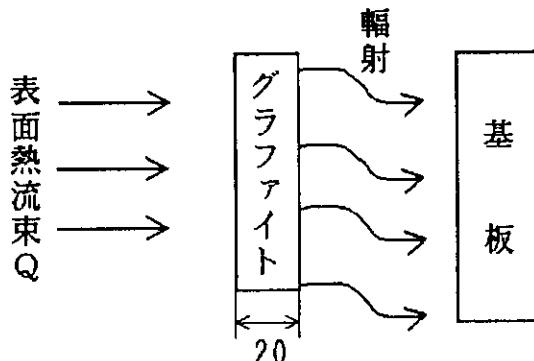
i) 第1壁の表面と裏面から輻射で除熱

向き合う面の輻射率 $\epsilon_2 = 0.2 \sim 0.8$



ii) 第1壁の裏面からの輻射で常熱

向き合う面の輻射率 $\epsilon_2 = 0.2 \sim 0.8$



(3) 計算式

i) 表裏面からの輻射伝熱

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{\lambda}{t} (T_1 + T_2) \\ &= \sigma \cdot \frac{1}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2) - 1} \cdot T_2^4 \\ Q_1 &= \sigma \cdot \frac{1}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2)} \cdot T_1^4 \end{aligned}$$

ii) 裏面のみからの輻射伝熱

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\lambda}{t} (T_1 - T_2) \\ &= \sigma \cdot \frac{1}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2)} \cdot T_2^4 \end{aligned}$$

(4) 热解析結果

Fig. 4.1.1 にアーマーの表裏から輻射伝熱で冷却する場合についての表面熱流束と輻射率をパラメータにしたアーマー表面及び裏面の温度を示す。基板及び対向面をグラファイト想定し $\epsilon = 0.8$ とした場合、プラズマの不純物の観点からアーマーの最高温度を 1750 °C とすると熱流束は約 1 MW/m² まで許容できることになるが、部分的なピーク熱流束以外の熱流束がピーク熱流束の 30 %程度と仮定するとこの部分のアーマー表面温度は約 1250 °C となり、本モデルによる計算条件から外れることになり Fig. 4.1.1 から求めた値をそのまま使用するのは危険である。

Fig. 4.1.2 はアーマーの表面のみから輻射伝熱で冷却する場合の結果を示す。前記と同様にアーマー表面温度を 1750 °C 以下におさえるものとすると許容熱流束は 0.37 MW/m² である。なお、この場合、アーマー裏面温度差は約 250 °C となる。

4.1.2 ディスラップション時の温度上昇

ディスラップション時の温度解析については S 62年度に行なった検討結果（次期大型装置安全性設計及び第 1 壁、炉本体分解修理設計）から概要を記す。

(1) 解析条件

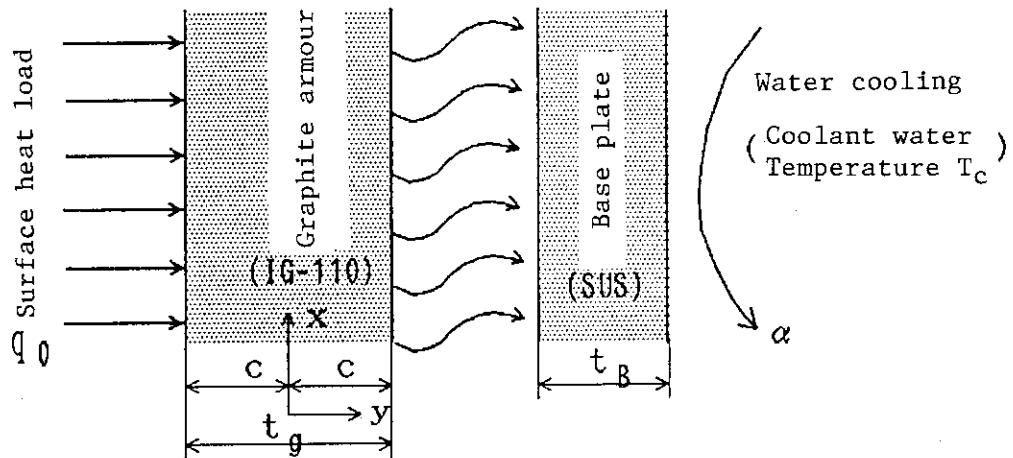
i) 負荷条件

Table 4.1.1 に負荷条件を示す。

ii) 材料データ

材料は IG-110 相当とし, Table 4.1.2 に諸物性値を示す。

(2) 解析モデル



$$t_g : 10, 20, 30 \text{ mm}$$

$$t_B : 5 \text{ mm}$$

$$T_c : 50 \text{ }^\circ\text{C} (\text{一定})$$

$$\alpha : 1.08 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

(注) 冷却条件は '86 年度 F E R 第 1 壁設計条件を用いた。

(3) 热解析結果

アーマー板厚 $t_g = 20 \text{ mm}$, 通常運転表面熱負荷 $q = 50 \text{ W/cm}^2$ の燃焼時におけるアーマー温度分布を初期温度として, ディスラプション時の蒸発/溶融を考えた熱解析を行った。

アーマー表面温度

Fig. 4.1.3 にディスラプション時の蓄積エネルギー密度 E, 負荷時間 t_{pulse} をパラメータにして, アーマー表面温度を求めた結果を示す。負荷時間 15 ms, 50 ms のディスラプションでは蓄積エネルギー E の $1 \text{ MJ/m}^2 \sim 3 \text{ MJ/m}^2$ の増加に対しては表面温度は $4200 \text{ }^\circ\text{C} \sim 4300 \text{ }^\circ\text{C}$ と大きな変化はない。0.1 ms ディスラプションでは, 表面温度の上昇はほぼ飽和して, 蓄積エネルギーの増加はその分アーマーの昇華量を増加させるために消費される。

4.2 ディスラプション時の電磁力, 強度検討

プラズマ・ディスラプション時に, グラファイトタイルの第 1 壁に生じる電磁力, 応力を評価する。検討の対象は '87 年度の核融合次期装置設計 FER (ACS-M) とした。Fig. 4.2.1 に装置断面図を示す。

(1) 検討条件

(a) プラズマの条件

プラズマ電流 : $I_p = 8.74 \text{ MA}$
 プラズマ主半径 : $R_p = 4.417 \text{ m}$
 プラズマ副半径 : $a_p = 1.249 \text{ m}$
 消滅時定数 : $\tau_{ex} = 15 \text{ ms}$

(直線的な変化とする)

(b) 第1壁の条件

形 状 : 正方形の黒鉛タイル
 板 厚 : $d = 20 \text{ mm}$
 比抵抗 : $\rho = 10 \mu \Omega \cdot \text{m}$
 プラズマ電流に : $B_N = 0.8 \text{ T}$ (最大値)
 よる直交磁場

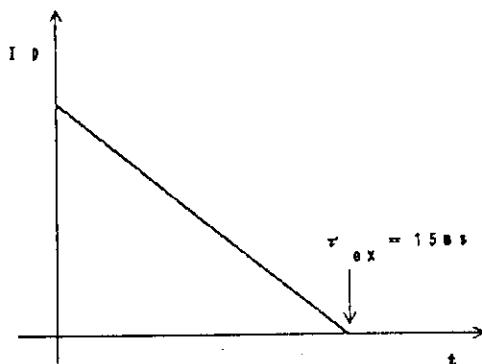


Fig. 4.2.1 に第1壁タイルに直交する磁場が最大の位置を示す。

以後の検討は、この第1壁について行う。

(c) トロイダル磁場の条件

磁場強度 : $B_t = B_{t_0} \cdot R_p / R = 6.5 \text{ T}$
 ここで、 $B_{t_0} = 4.9 \text{ T}$, $R = 3.32 \text{ m}$ (第1壁位置)

(2) 検討結果

Fig. 4.2.2 に第1壁に流れる渦電流を示す。プラズマ消滅時定数 $\tau_{ex} = 15 \text{ ms}$, 黒鉛タイルの幅 $a = 200 \text{ mm}$ の場合、渦電流 $I \approx 270 \text{ A}$ となる。

Fig. 4.2.3 に第1壁に生じる電磁力を示す。 $\tau_{ex} = 15 \text{ ms}$, $a = 200 \text{ mm}$ の場合、電磁力 $F = 24 \text{ kg}$ となる。電磁力の方向はタイルの左右で反対となり、タイルにはモーメントが作用する。

黒鉛タイルに生じるモーメントは、タイル中央のボルト部で支持される。その際、黒鉛の中間断面には曲げ応力が生じる。Fig. 4.2.4 に第1壁に生じる曲げ応力を示す。 $\tau_{ex} = \pm 0.15 \text{ kg/mm}^2$ となる。

(3) まとめ

IG-110 グラファイトの場合、 $N = 10^5$ 回の疲労強さ σ_{max} は、片振り試験 ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0$) の時に 1.5 kg/mm^2 である。 $a = 300 \text{ mm}$ としても、タイルに生じる曲げ応力 σ_b は、疲労強さ σ_{max} の $1/2$ 以下である。しかし、ボルト支持部近傍の応力集中、熱応力との重畠、プラズマ消滅条件の不確かさがある。第1壁には厳しい熱衝撃応力が生じることを考えると、電磁力による応力はできるだけ小さな値に設定しておくことが望ましい。以上より、タイルの幅 a は最大 $150 \sim 200 \text{ mm}$ を目安とする。

c/c コンポジットの場合、グラファイトよりも引張強さが高いため、大きなタイル幅が許容できる。しかし、上記のような不確かさもあり、タイルの幅 a は最大 200 mm を目安としておく。

Table 4.1.1 Specification of plasma disruptions

通常運転時	
表面熱負荷	0.2 MW/m ² ~ 0.8 MW/m ²
体積発熱率	グラファイト (c/c) 6 MW/m ³ 12 MW/m ³ 12 MW/m ³
粒子束	f : F ₀ exp (-Z/λ) F ₀ : 1 × 10 ²² /m ² · s λ : 20 cm Z : ヌル点から壁面に沿った距離 f : 2 (ピーピング係数)
粒子エネルギー	60eV (Z = 0) ~ 20.eV (トーラス上部) 直線分布
粒子組成	50% D, 50% T
負荷時間	Burn Time : 100 ~ 800 sec Off - Burn Time : 50 ~ 300 sec
デイスラッシュ時	
表面熱負荷* MJ/m ²	1.0, 2.0, 3.0
負荷時間 ms	0.1, 5, 15, 50

* 内側第一壁に部分的保護機構を付ける場合次式によるピーピング係数を考慮すること。

$$0.4 + 0.6 / F, \quad F : \text{保護領域のカバレッジ}$$

Table 4.1.2 Material data for armour tiles

入手可能データの豊富さより IG-110 に相当するデータをベースとする。

照射量 $2 \times 10^{22} / \text{cm}^2$

T : 溫度 °C

Density	Mg/m ³	1.75
Specific heat	KJ/Kg.K	$2.09 + 1.81 \exp \{ - (T + 273) / 600 \}$
Thermal conductivity	w/m.K	0.8 $13.0 + 1.86 \times 10^{-2} * T$ 但し, $T > 1100$ °C の時 $T \equiv 1100$ °C
Vapourization latent heat	MJ/Kg	59.1
Saturated vapour pressure	Pa	$\exp \{ 32.1 - 8.85 \times 10^4 / (T + 273) \}$
Expansion rate	$10^{-6}/K$	$3.91 + 1.44 \times 10^{-3} * T$ 但し, $T > 1100$ °C の時 $T \equiv 1100$ °C
Young's modulus	GPa	$27.1 - 1.27 \times 10^{-2} * T$ 但し, $T > 900$ °C の時 $T \equiv 900$ °C
Poisson's ratio		0.14
Strength	MPa	引張 17.2 (σ_t) 圧縮 56.9 (σ_c)
Fatigue curve		Fig. 2.2 - 1

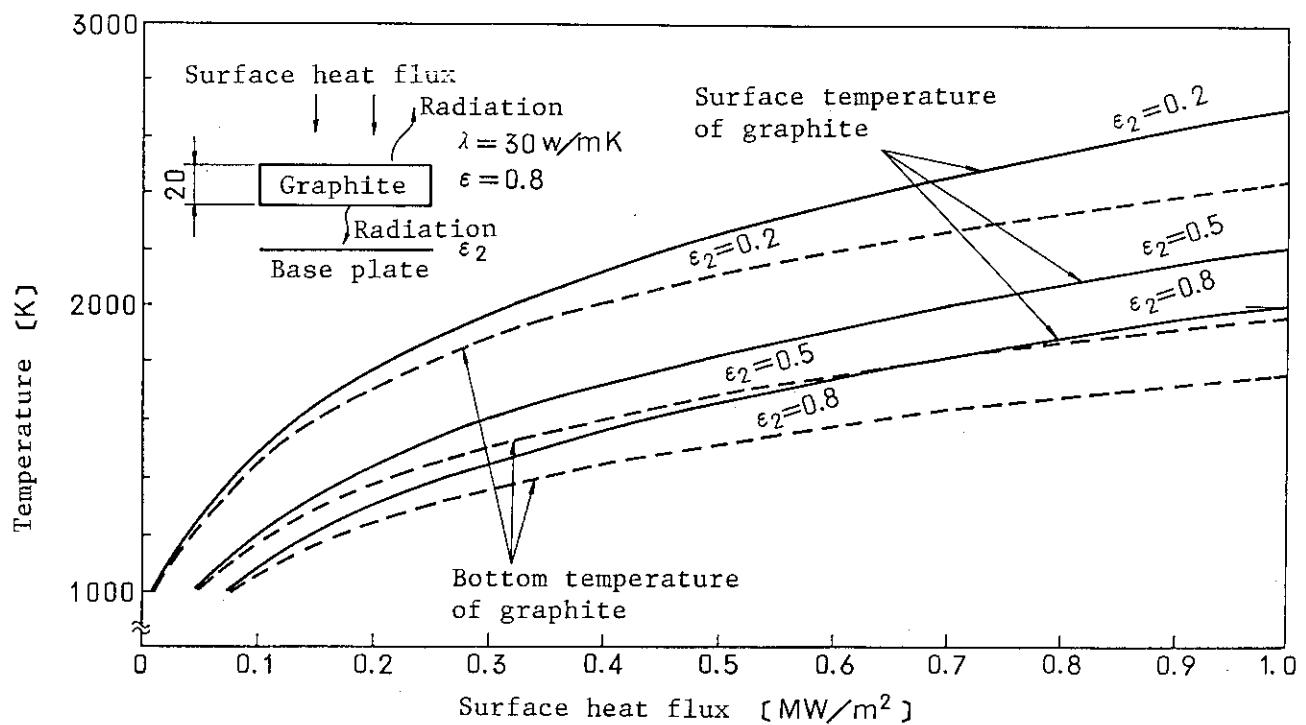


Fig. 4.1.1 Graphite temperature due to radiation cooling from the surface and the bottom in steady state.

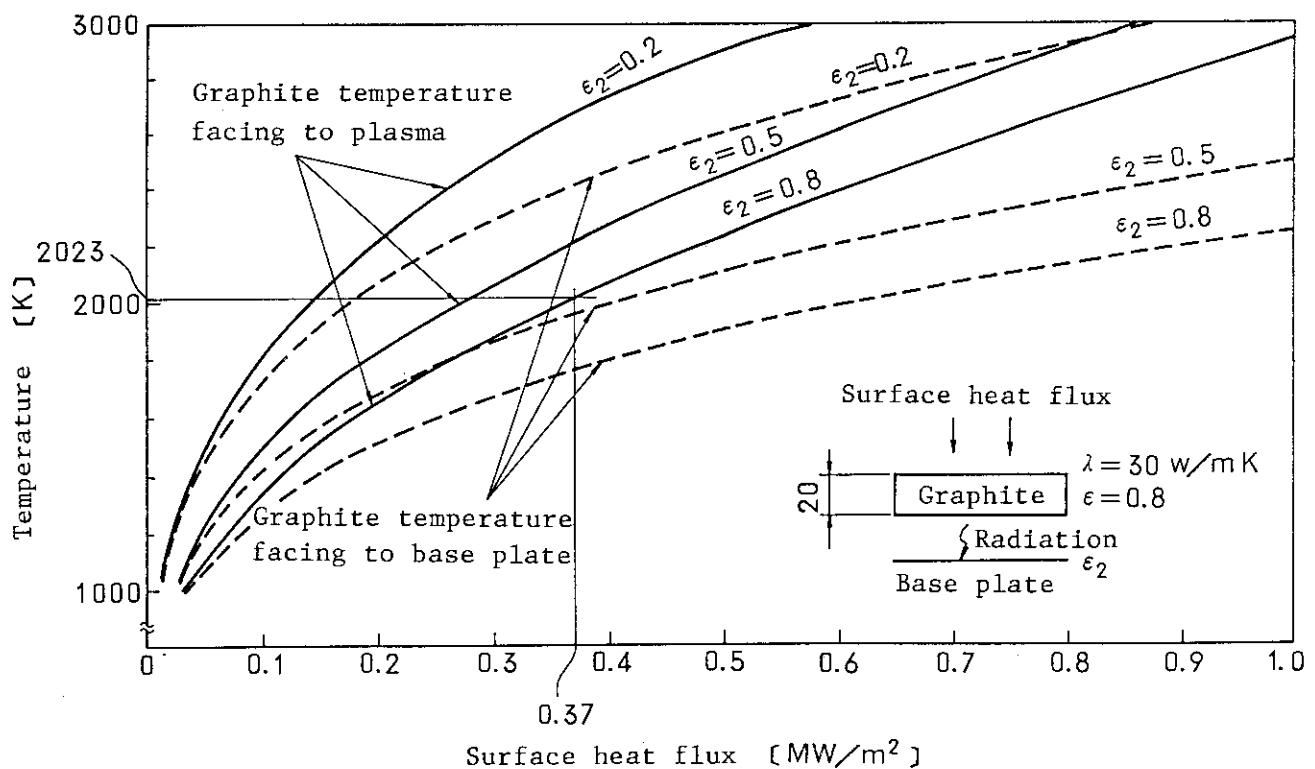


Fig. 4.1.2 Temperature due to radiation cooling from the surface in steady state.

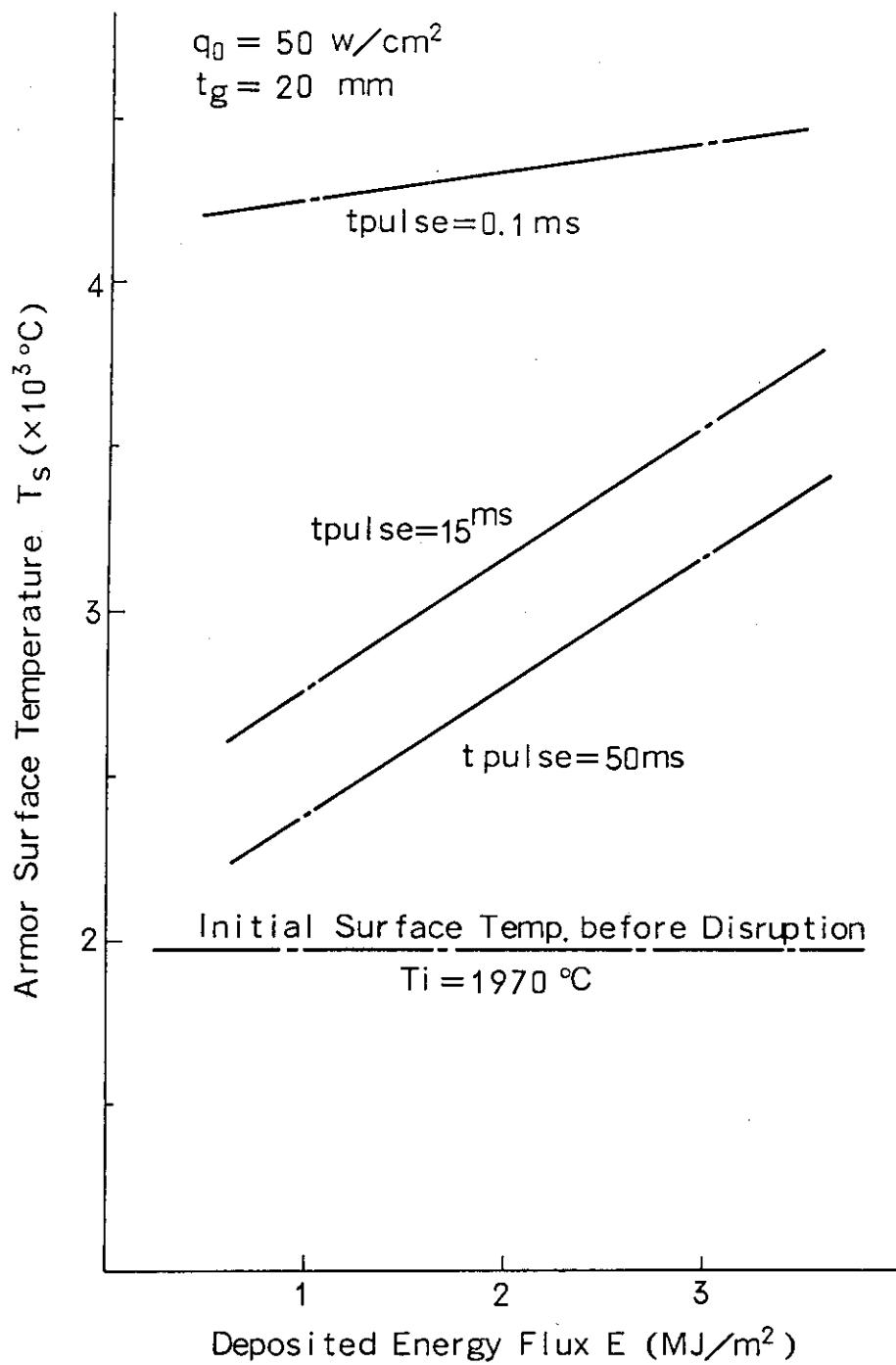


Fig. 4.1.3 Heat load and armour surface temperature during plasma disruption.

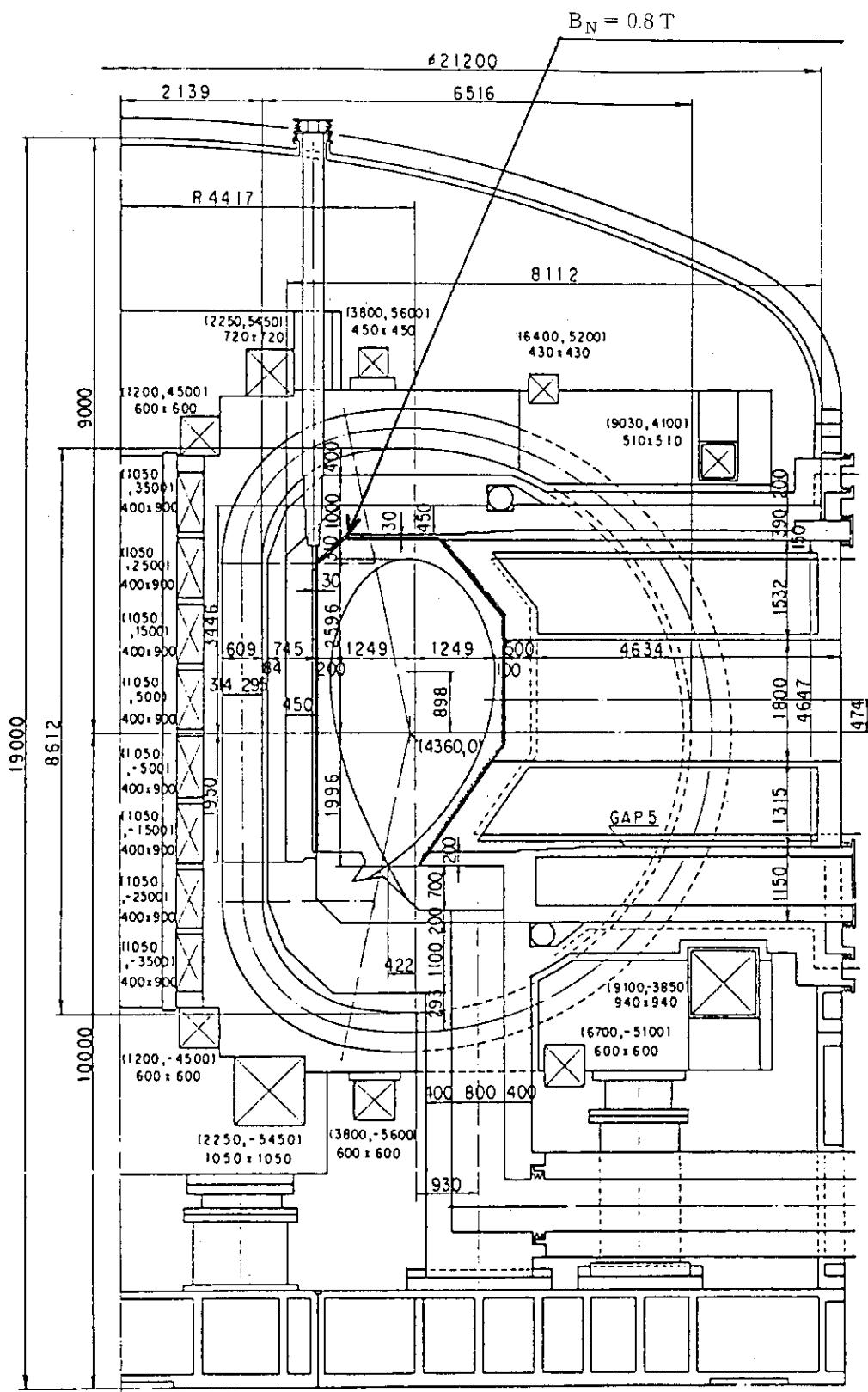


Fig. 4.2.1 Elevation view of FER (ACS-M, Reference plasma)

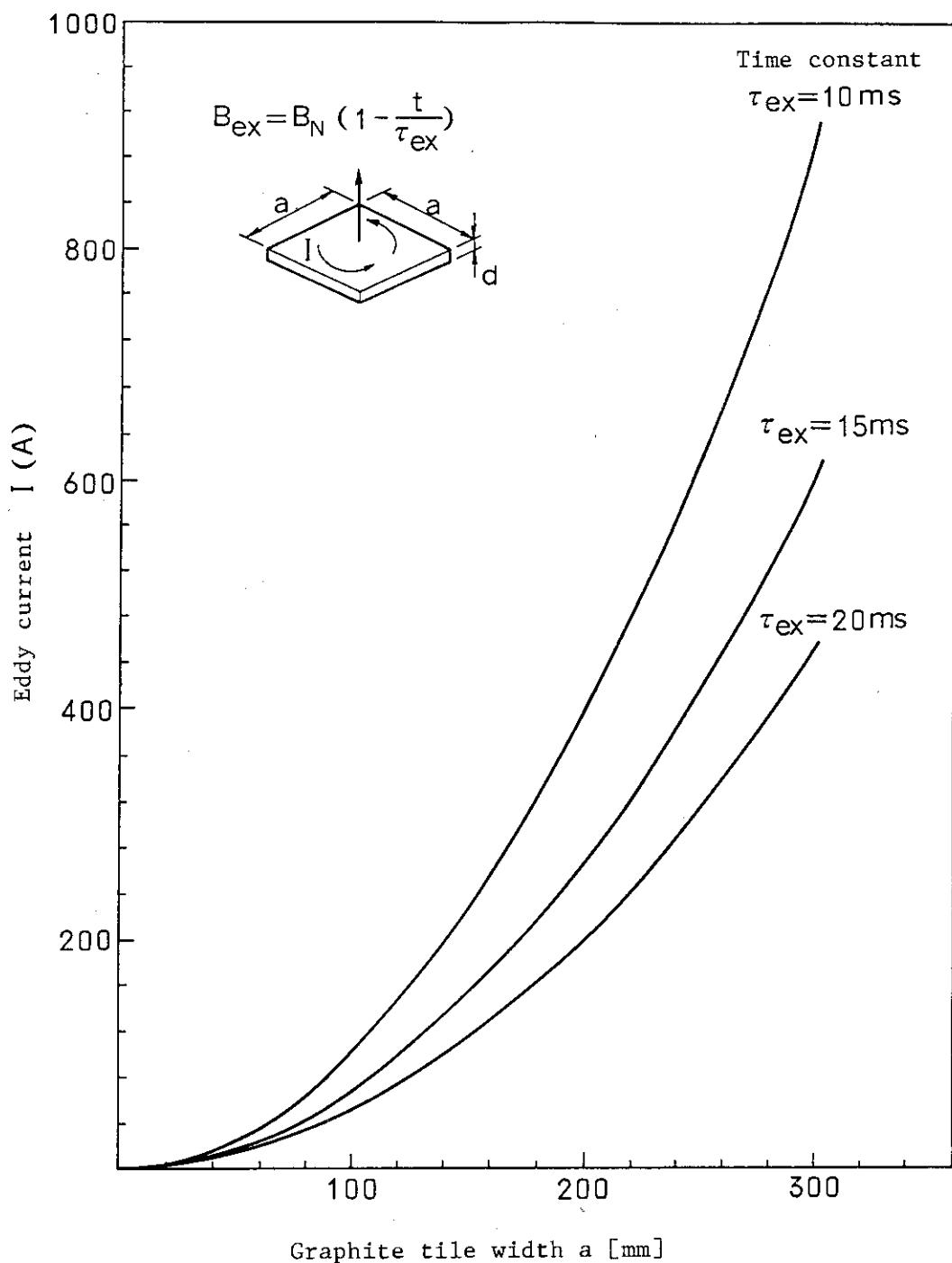


Fig. 4.2.2 Eddy current of first wall during a plasma disruption.

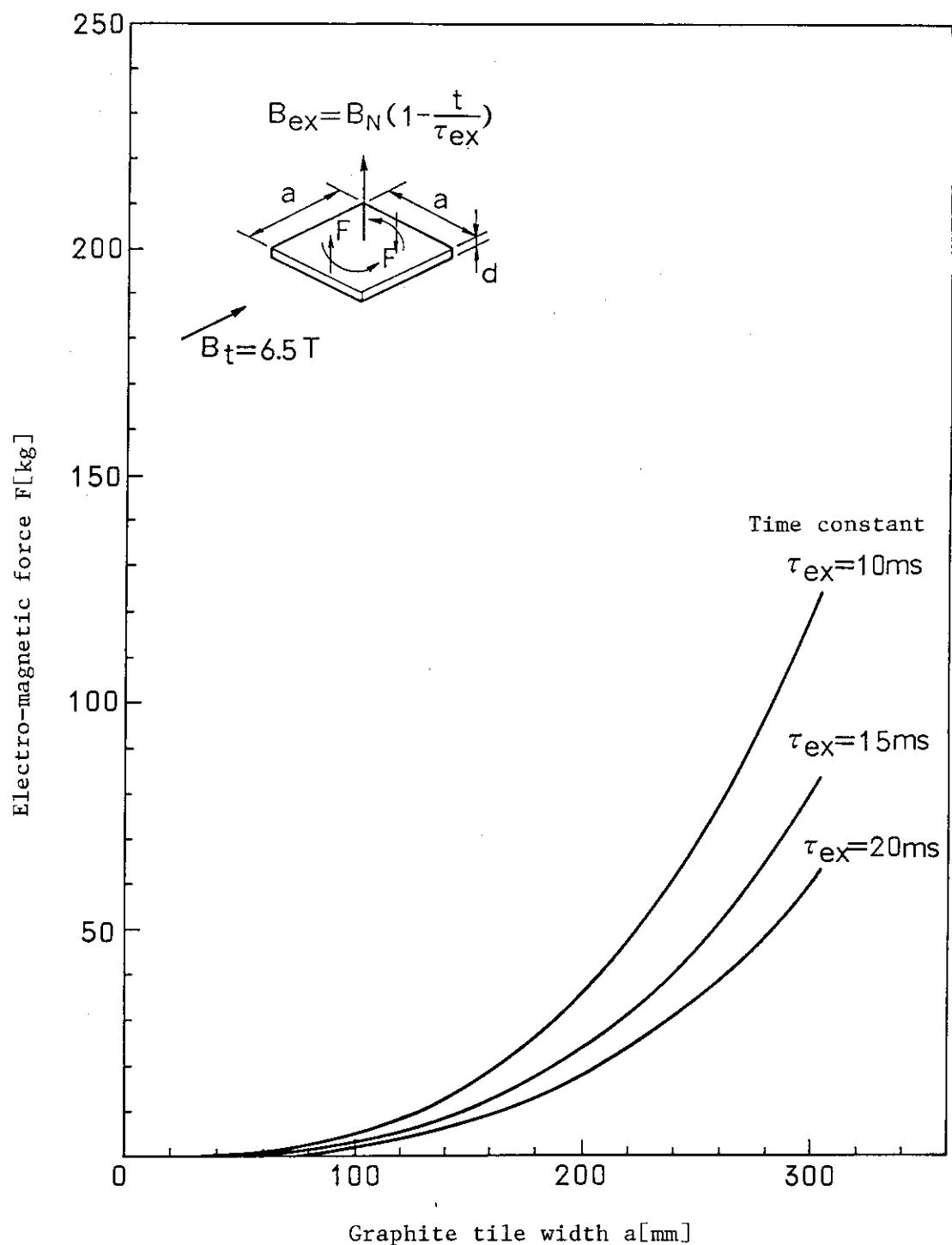


Fig. 4.2.3 Magnetic force of first wall during a plasma disruption.

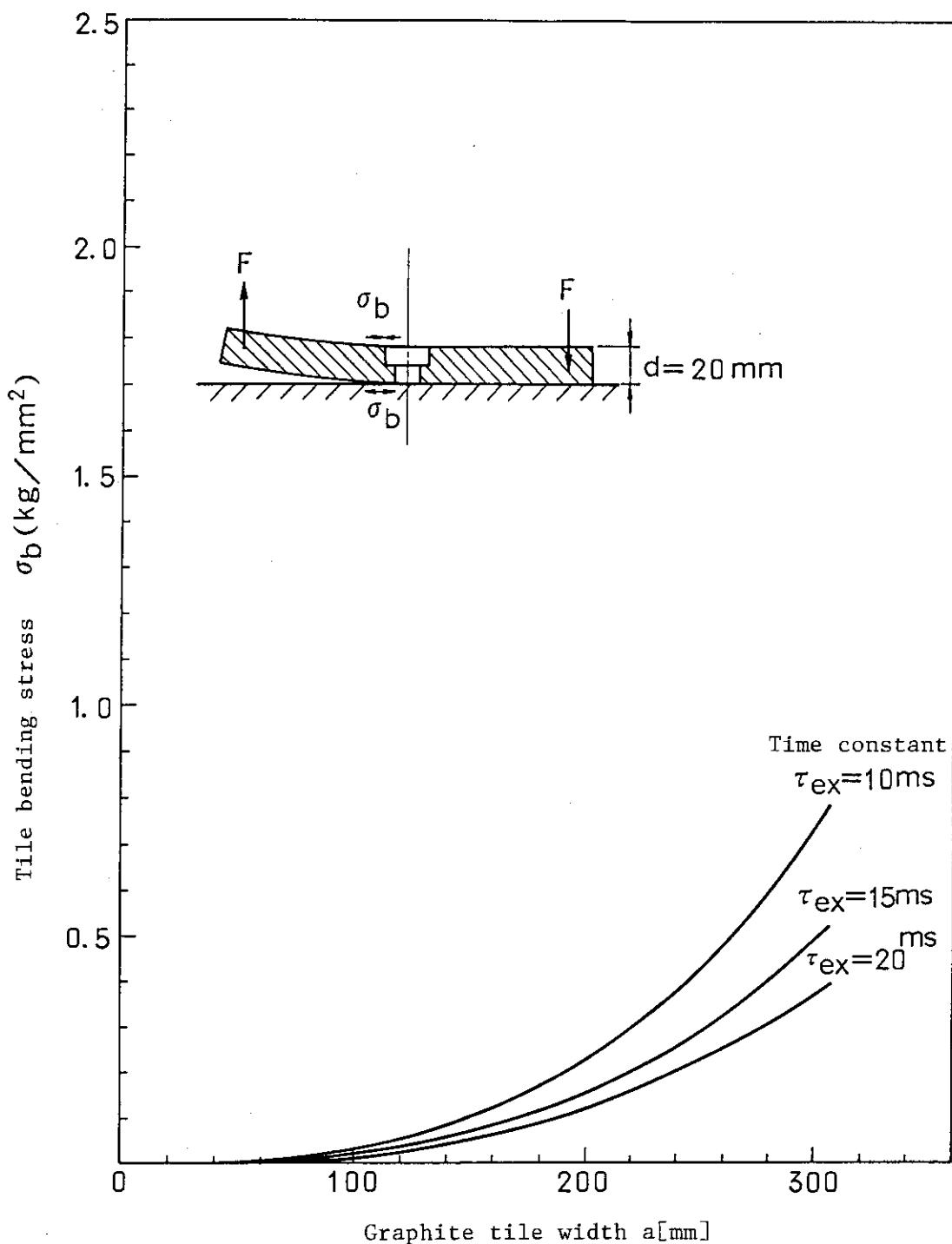


Fig. 4.2.4 Bending stress of first wall during a plasma disruption.

5. アーマータイル取付の新手法

第1壁アーマータイルの構造及びその取付構造については今まで多くの設計・検討がなされており、その取付構造はその炉（装置）の熱負荷条件等に適合した構造がとられている。一方、核融合炉の高性能化にともない、熱負荷条件等はますます厳しい値となり、機械的接続アーマータイルでは冷却の点から対応できない例が多い。

ここではアーマータイルの交換法として形状記憶合金（SMA）を利用した構造とクイック取付の構造について検断結果を述べる。

5.1 SMA適用構造

(1) 構造例 - I

Fig. 5.1.1～Fig. 5.1.3 に SMAパイプ継手を使用したアーマータイルの取付構造を示す。縦断面図でアーマータイル（グラファイト）は冷却基板（SUS）に冶金的に接続する構造である。アーマータイルにはマニピュレータのハンドリングのための切欠き部を設ける。冷却基板と遮蔽体（あるいはブランケット）間の接続は SMAパイプ継手により行う。接続部は2重管構造で外側の SMAパイプ継手の内部に別のパイプを設けインロー構造により接続し、冷却水の給・排を分離する構造である。機械的接続及び冷却水のシールは SMAパイプ継手により行う。SMAパイプ継手の外周側には冷却基板から設けた円筒状のカバーを設け、SMAパイプ継手を冷却、加熱する場合、冷却・加熱媒体が効果的に SMAパイプ継手に作用するようとする。また、このためのアーマータイル、冷却基板を貫通する穴を2ヶ所設け、冷却・加熱媒体の導入口とする。

Fig. 5.1.2 は冷却基板の冷却流路を示し、Fig. 5.1.3 はアーマータイルの分割を示す。この構造に対する問題点としては次のものが考えられる。

- ① SMAパイプ継手の照射による特性変化
- ② SMAパイプ継手の冷却水シール特性
- ③ SMAパイプ継手の冷却（中性子発熱に対する）
- ④ 遮蔽体側冷却流路の構成及びアーマータイル側への接続と圧力損失の増大
- ⑤ 組立時、3つの部品の挿入組立性

Fig. 5.1.4 に遮蔽体側の冷却流路の構成を示す。

(2) 構造例 - II

Fig. 5.1.5 に構造例 - II のアーマータイル取付構造を示す。この構造はアーマータイルの機械的接続と冷却間の接続を別構造とし、機能を分離したものである。アーマータイルは冷却基板に冶金的に接続し、冷却基板と遮蔽体間は SMAロッド（両端に支持突起を設けたもの）により締結する。SMAロッドの支持突起部は図中の断面 B-B に示すような形状とし、相手遮蔽体にはこの突起部が挿入できる穴を設ける。SMAロッドを挿入後、ロッドを 90° 回転させ

た状態でSMAロッドを変態点温度以上に加熱すれば締結は完了し、強固に接続される。

冷却管の接続はSMAパイプ継手により行う。冷却基板側にベローズを備えた冷却管にSMAパイプ継手を保持する構造とし、接続時、遮蔽体側に立てた冷却短管に挿入し接続を行う。なお、冷却管は入口、出口2本独立に接続する構造とする。

この問題点としては前述の構造例-Iの場合とほぼ同じものが考えられる。

- ④ SMAパイプ継手の照射による特性変化
- ⑤ SMAパイプ継手の冷却水シール特性

5.2 クイック取付構造

(1) 構造例-III

Fig. 5.2.1は放射状に摺動するピンにより第1壁支持部を支持する構造を示す。この構造は受熱板（あるいは冷却基板）の裏側に円筒状の脚部を設け、この脚部の内部に放射状に摺動可能な複数のピンと、このピンを押圧するストッパを設けたものである。また受熱板の中央には操作用の穴が設けてある。

円筒状脚部を遮蔽体に設けた取付穴に挿入し、ストッパを回すことによりストッパは前進し、テーパー部で放射状に配置したピンを突出させ取付穴壁面に設けたピボットに当てて支持固定する。

分解時はストッパを逆に回すことにより、ピンは支持が開放され受熱板を容易に軸方向に引き抜くことができる。

この構造に対する問題点としては次のものが考えられる。

- ⑥ 受熱板の冷却は対向基板への輻射冷却
- ⑦ ストッパ、ピン等の冷却法
- ⑧ 冷却基板（遮蔽体）の冷却流路の構成

(2) 構造例-IV

Fig. 5.2.2は前述のFig. 5.2.1の構造のなかでピンの駆動構造を変えたものである。図中の断面A-Aに示すように渦巻き状ストッパを回転させることにより、ピンの固定、解除を行う構造である。この構造に対する問題点は構造例-IIIの場合とほぼ同じである。

5.3 アーマー取付ボルト冷却構造

従来検討された機械的接続第1壁の場合の問題点の1つは接続ボルトの冷却である。Fig. 5.3.1に冷却可能なスタッドボルトによる第1壁取付構造を示す。内部に冷却流路を構成したスタッドボルトを遮蔽体に設けた取付穴に挿入し、先端を抵抗溶接により接続し、また穴表面の周囲はシール溶接を行う。スタッドボルト穴は2つの冷却流路の中央に設け、冷却流路がつながるようにする。

この点の問題点として、

- ⑨ 冷却流路がスムーズな形状でないため圧損が大きい。^{*1}

(b) スタッドボルト廻りの真空シール（圧力バウンダリ）の信頼性

(c) スタッドボルトの構造が複雑

等が考えられる。

注 * 1) 流路の圧力損失

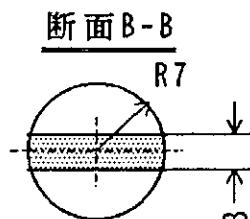
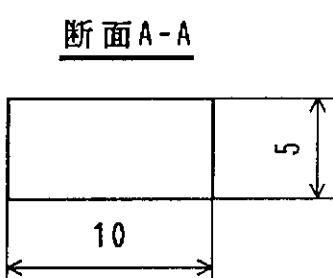
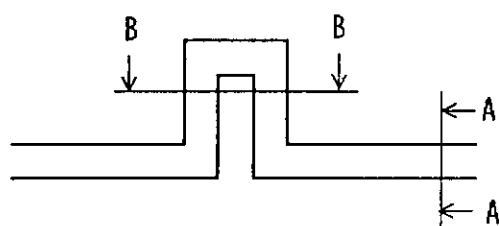
S 59 年度 FER 第 1 壁の設計例は管路長 $\ell = 5 \text{ m}$, 流速 $v = 2 \sim 3 \text{ m/s}$, 断面 $S = 5 \times 10 \text{ mm}^2$

$$\text{直管部圧損 } \Delta h_1 = \lambda \cdot \frac{\ell}{4 \text{ m}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{m})$$

$$\text{曲がり部圧損 } \Delta h_2 = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{m}), \quad \zeta = 9.5 \sin^2 \left(\frac{\theta}{4} \right)$$

θ : 曲がり角度

[ボルト部冷却流路]



流速 $v = 3 \text{ ms}$ とすると,

$$\Delta h_1 = 7.0 \text{ m}, \Delta h_2 = 2.55 \text{ m} / \text{ボルト 1 ケ所}$$

アーマーの大きさを $200 \square$ とするとアーマーの設置数は $N = \ell / 200 = 5000 / 200 = 25$ となり,

$$\Delta H_2 = N \cdot \Delta h_2 = 25 \times 2.55 = 63.8 \text{ m}$$

従って、全圧損は

$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta H_2 = 7.8 + 63.8 = 71.6$$

と、かなり大きな値となる。

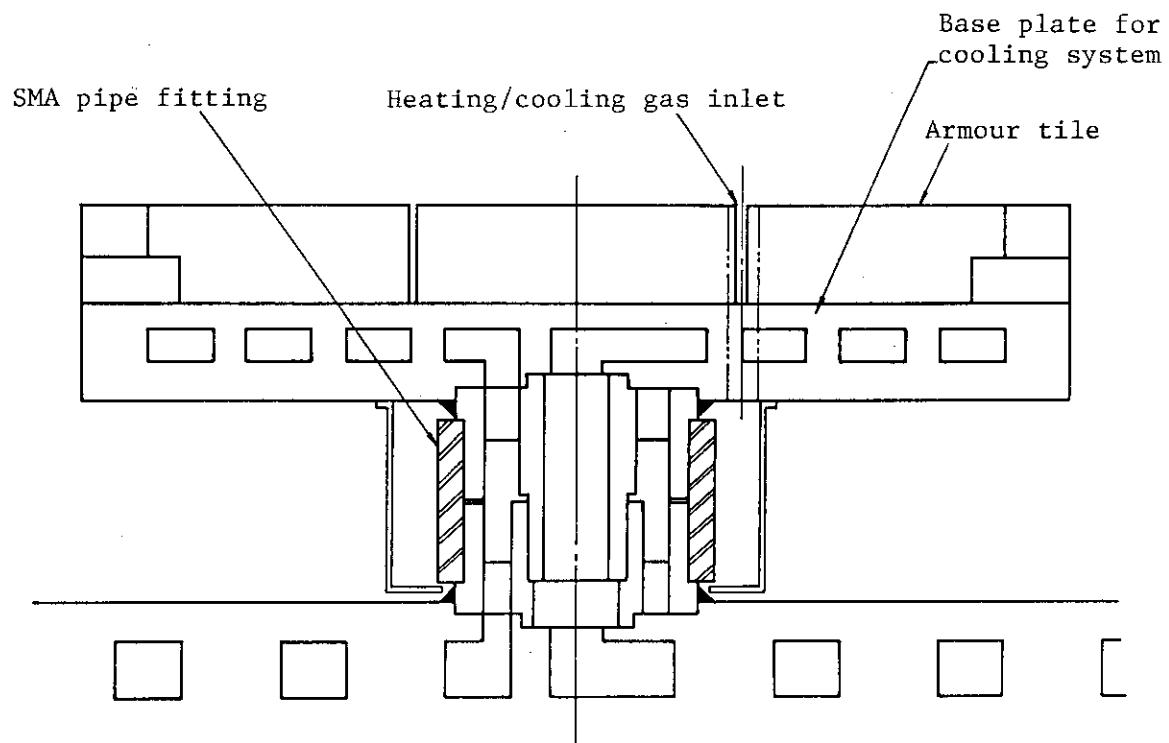


Fig. 5.1.1 First wall armour tile attachment design (I).

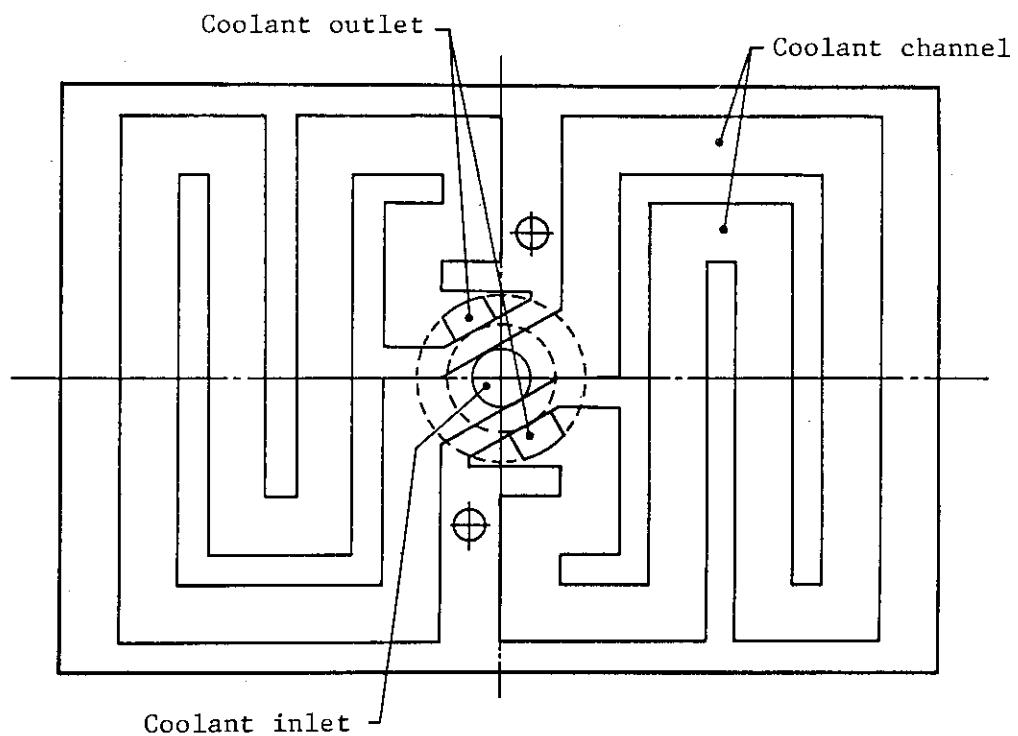


Fig. 5.1.2 Coolant channel for tile base plate.

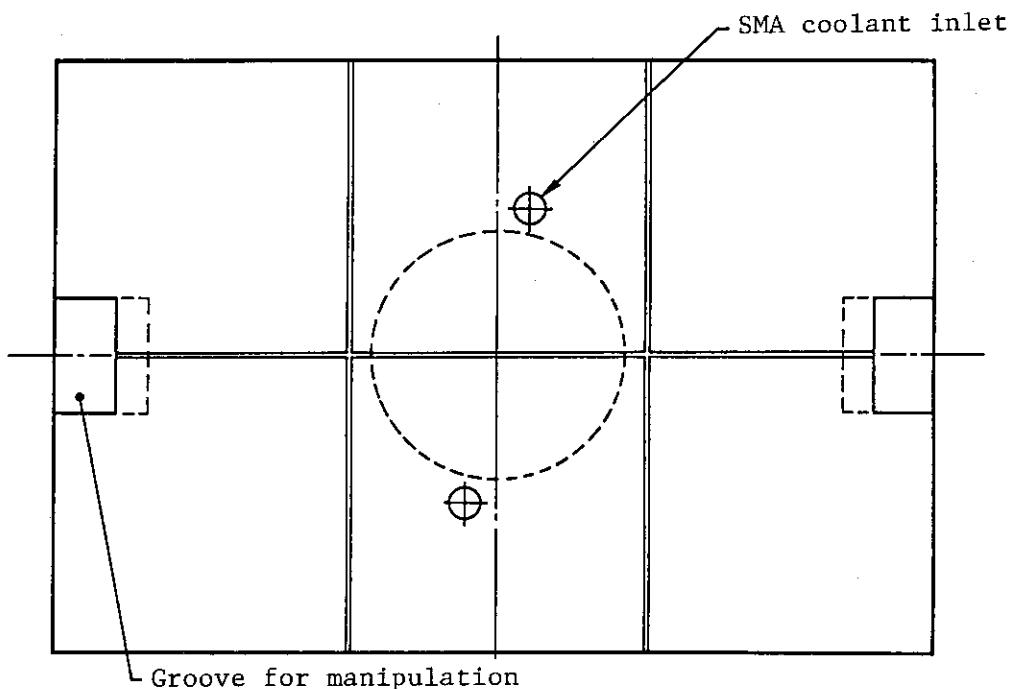


Fig. 5.1.3 Armour tile coolant channel.

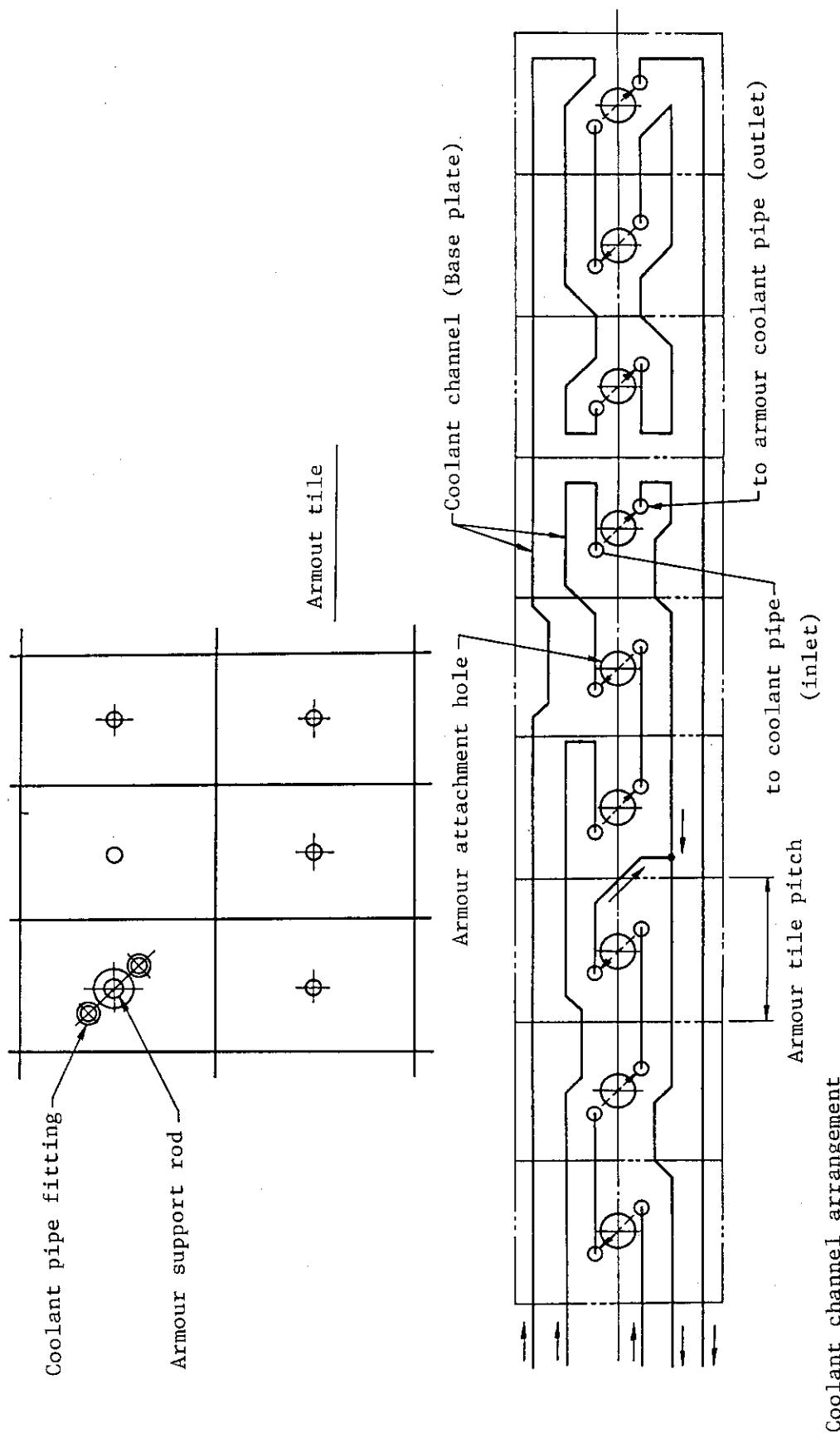


Fig. 5.1.4 First wall armour tile attachment design (II).

Coollant channel arrangement

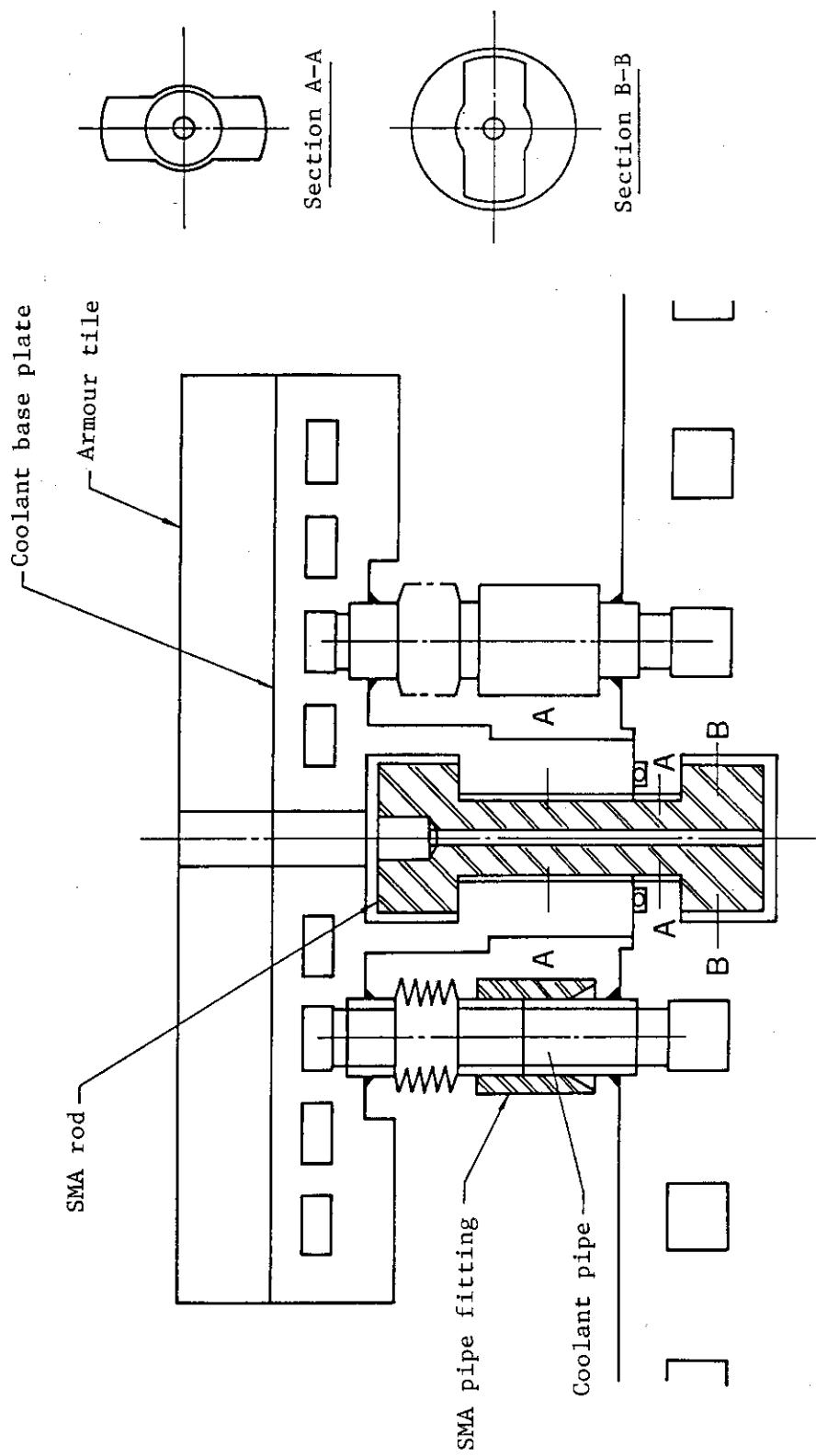


Fig. 5.1.5 Base plate coolant channel for armour tile.

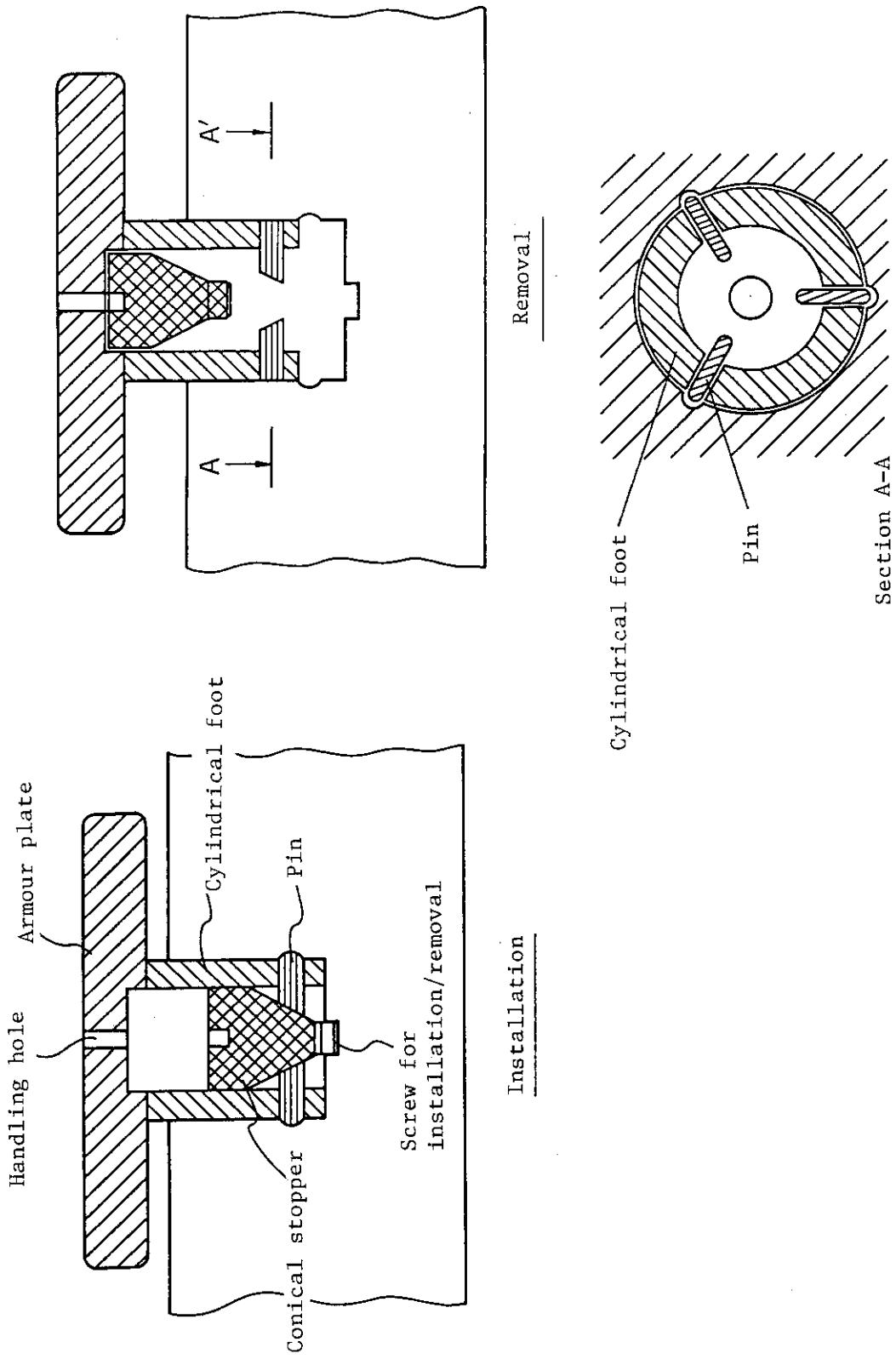


Fig. 5.2.1 First wall armour tile attachment design (III).

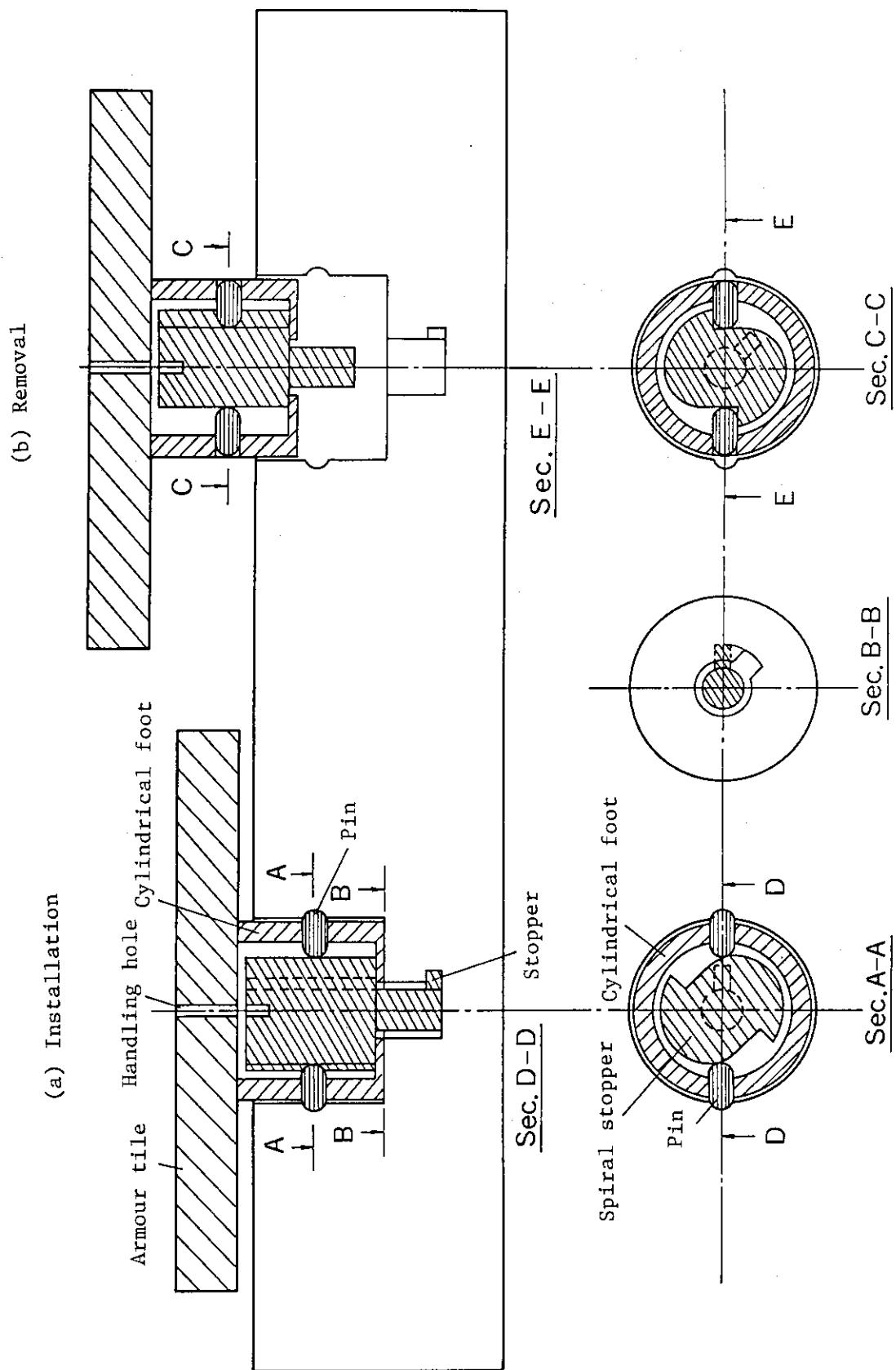


Fig. 5.2.2 Armour tile attachment design (IV).

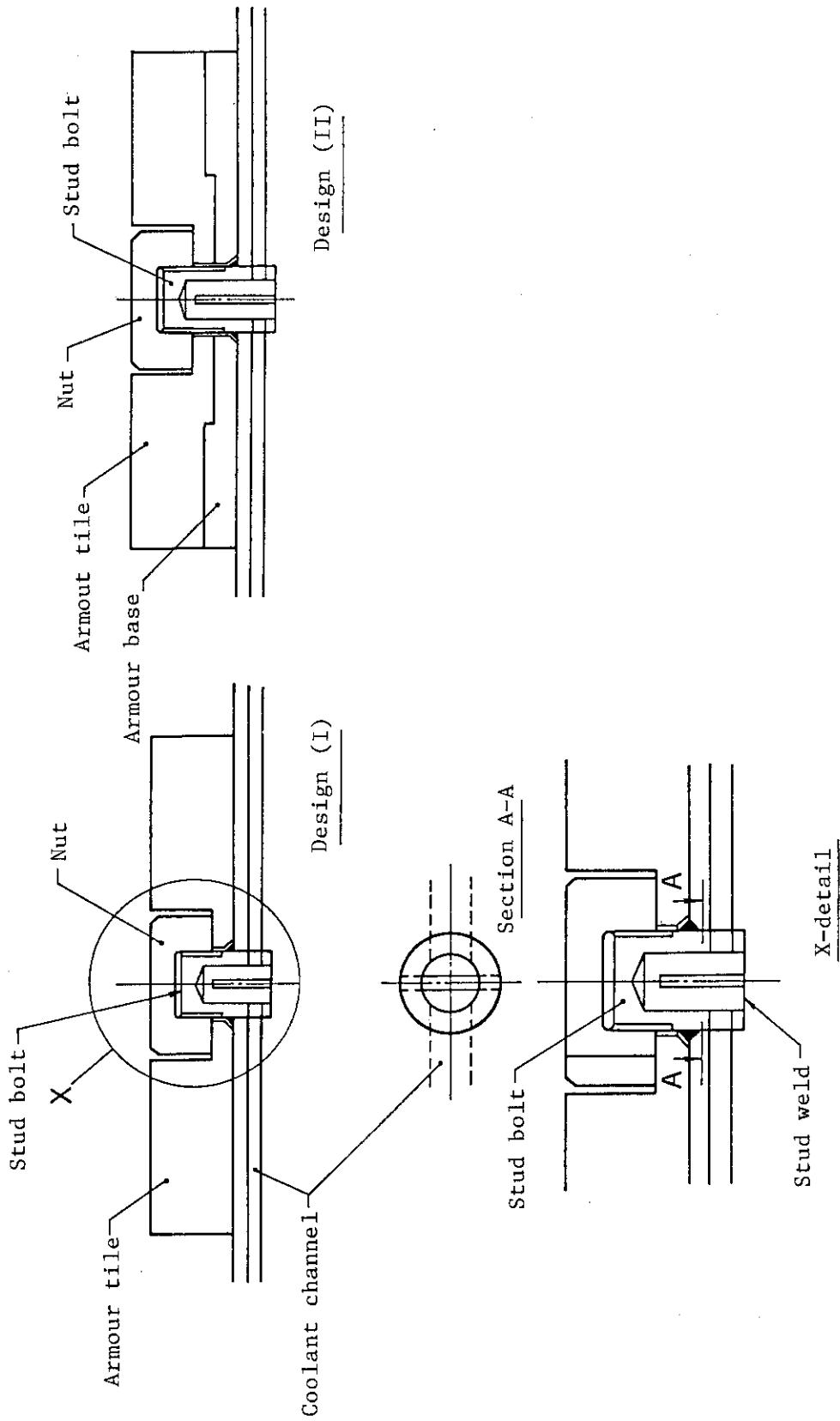


Fig. 5.3.1 Armour tile stud bolt coolant channel.

6. タイル交換に必要なシステム

6.1 システムの分類

タイル交換作業は大別して2つの作業に分類される。1つは損傷したタイルを見つけだす作業、他の1つは損傷したタイルを予備タイルと交換する作業である。これら作業に必要なシステムをそれぞれ点検システムと交換システムと呼ぶことにすると、これらシステムの特徴は以下のようになる。

(1) 点検システム

〔目的〕

定期的に炉内に入り、損傷タイルの発見を行う。例えば数ショット毎に炉内にいれてもよい。

〔点検項目〕

- ⅰ) タイルの溶融・損傷等と比較的損傷部分の大きさが大きい損傷の点検
- ⅱ) 微小クラック(1mm以下)の発見
- ⅲ) ボルト固定型タイルの場合は、ボルトの緩みの発見のように固定部が所定の位置で所定の大きさの力で固定されているかの点検

〔環境条件〕

定期的な点検において、時によっては交換すべき損傷タイルがないこともある。従って、炉停止時間をなるべく短くするために点検は炉停止後、すぐに開始されることが望ましい。従って、以下の厳しい環境でも対応できる方がよい。

- ⅰ) 真空中で行う(10^{-5} Torr程度)
- ⅱ) 炉室内温度： $\sim 300^{\circ}\text{C}$
- ⅲ) γ 線線量率： 10^6 rad/hour

〔備考〕

点検項目ⅰ)はJETやJT-60で使用しているペリスコープの類で対応できるが、項目ⅱ)、ⅲ)はペリスコープで対応できない。接触型のセンサが必要である。

(2) 交換システム

〔目的〕

- ⅰ) 損傷したタイルの交換と搬送撤去
- ⅱ) ボルトの締め

〔アーマータイルの特徴〕

例えばFERのMINI炉⁽⁵⁾で検討されたものは、

寸法： $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 10\text{ mm}$

材料：グラファイト

重量： 100 g 以下で非常に軽量

〔環境条件〕

そのときの交換すべきタイルの総数にもよるが、なるべく短くする。

i) 真空中あるいは不活性ガス雰囲気で大気圧とする。大気開放はしない。

ii) 炉室内温度 ; 室温

iii) γ 線線量率 ; 10^6 rad/h

以上に示した点検システムと交換システムは、それぞれ性格が異なり、その必要な装置が異なる。しかし、炉内空間の大きさの制約、メンテナンスポートの大きさや数の制約、可能な限り作業時間を短くする等の観点から、これら2つのシステムを統合したシステムをここでは検討する。すなわち、メンテナンスポートより真空容器内に入り、タイルの損傷具合を1枚ずつチェックしつつ、損傷タイルを発見したら、即座にその場で新しいタイルと交換するものとする。

具体的には、既存技術であるJETやTFRで使用されている多関節ブームを基本とし、多関節ブーム先端にタイル交換用双腕マスター・スレーブ・マニピュレータとタイル損傷をチェックする視覚システム(Pan and tilt)及び微小クラック検出プローブを具備した単腕マニピュレータが付属している構成とする。これらは既存技術の組合せで対応可能である。

一方、損傷タイルを新しいタイルと即座に交換する場合、それらを収納するボックスも必要である。1回の作業でどのくらいの数のタイルの交換が必要かは不明だが、満杯となった収納ボックスを炉外に出すために多関節ブームをメンテナンスポートを介して頻繁に出し入れするのは作業効率を非常に悪いものにしてしまう。

6.2 タイル交換システムの概念

作業効率を低下させない手段として、ここでは多関節ブームは真空容器内にそのまま留まつたまま、収納ボックスだけ出し入れするシステムを検討してみた。類似した例としてNETのビーカー型の炉内点検作業システム⁽¹⁴⁾(Fig. 6.2.1)の概念がある。しかしこのビーカー型はトーラスを180°で対向した2つのメンテナンスポートから多関節ブームを挿入し、中間点(90°)でブーム先端を結合し、このブームをレールとしてビーカーが移動走行し、中間点(90°)のポート(中間ポート)で損傷コンポーネントを出し入れする方式である。しかしこの方式はメンテナンスポートを3つ必要とし、また中間ポートで損傷したコンポーネントを出し入れするための搬送システムが必要となり、全体としてのシステムが非常に大がかりなものになってしまう問題がある。

ここではFig. 6.2.2に示すタイル交換システムを検討した。図に示すように多関節ブーム上にレールを敷設し、その上にタイル収納ボックス用搬送車を走らせ、この搬送車をメンテナンスポートを介して出し入れする方法である。ブーム関節部でのレール屈曲はFig. 6.2.3に示すようにレールを多段構造とする。ただし、多段構造の具体的な構造、材質等は今後の課題である。レール方式の代替として多関節ブーム上にベルトコンベアを敷設してタイルを搬送する方法も考えられる。

なお、本方式での環境条件は交換システムを優先して

i) 真空中あるいは不活性ガス雰囲気(大気圧)とし、大気開放しない。

- ii) 炉室内温度 ; 室温
- iii) γ 線線量率 ; 10^6 rad/h

が望ましい。

Fig. 6.2.4 は、参考例として原研の昭和 63 年度の ITER/FER の炉心構造系にて検討された多関節ブームのブーム先端の撓み量を解析した結果である。ここでは、多関節ブームはダイバータ板をメンテナンスポートを介して引き出す炉内アクセス法で検討されたものである。Fig. 6.2.5 は多関節ブームの解析モデルを示し、メンテナンスポートより多関節ブームは真空容器内に入り R 5500 mm の空間即ち、中心部分を移動し、ブーム先端部でダイバータ板（重量 3000 kg）を把握した状態を示す。多関節ブームは 6 関節のブームよりなり、各ブーム長は 2700 mm で、各ブームの断面は肉厚 50 mm の 500 mm × 3000 mm の断面形状を示している。

Fig. 6.2.4 及び Fig. 6.2.6 に示すようにブーム先端部で最大、約 10 数 mm の撓みを示している。傾きに換算すると約 3° であった。しかし、この程度の撓み量はブーム先端の把持部の姿勢を制御することにより十分補正することができるので問題はない。

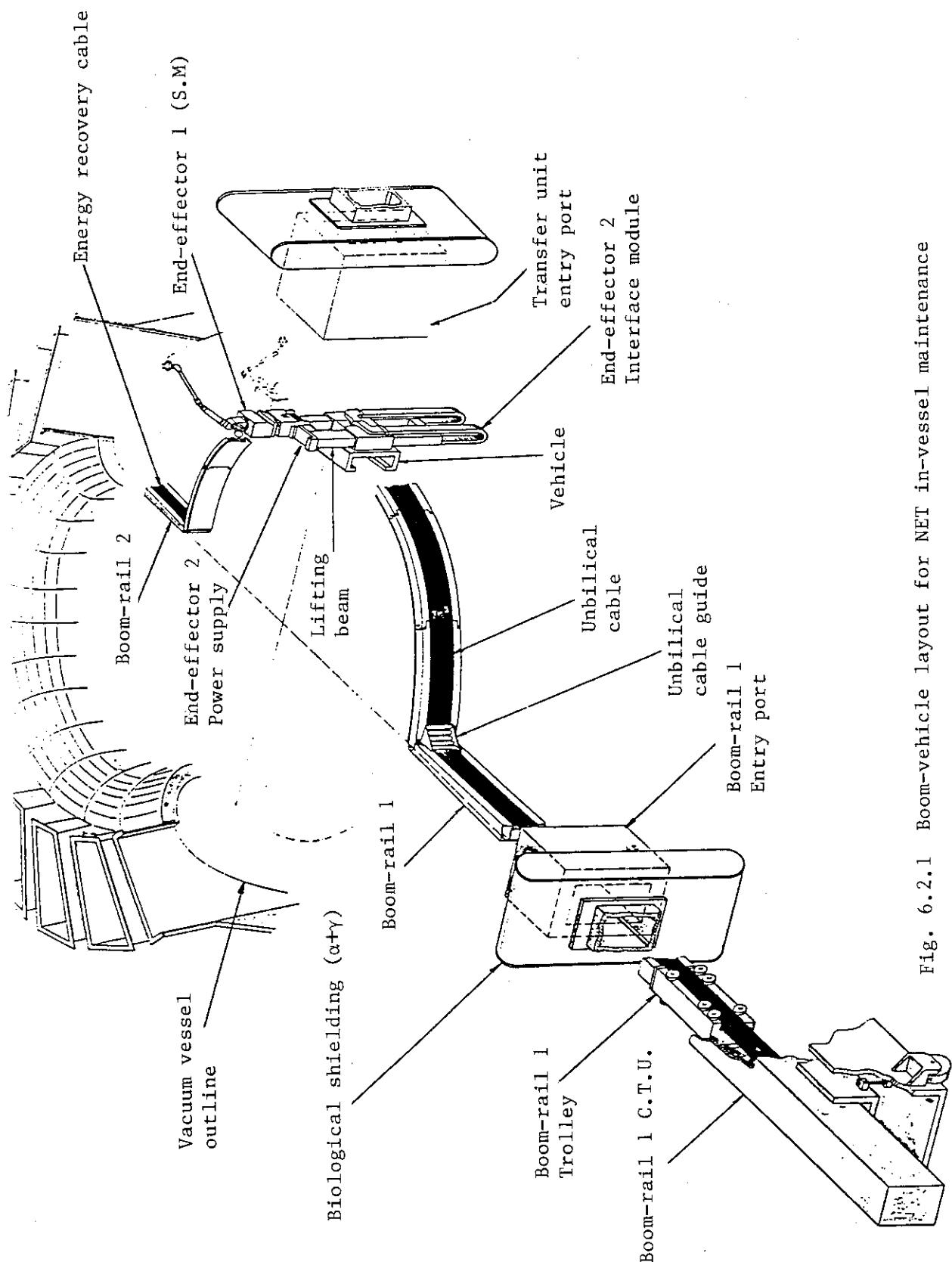


Fig. 6.2.1 Boom-vehicle layout for NET in-vessel maintenance

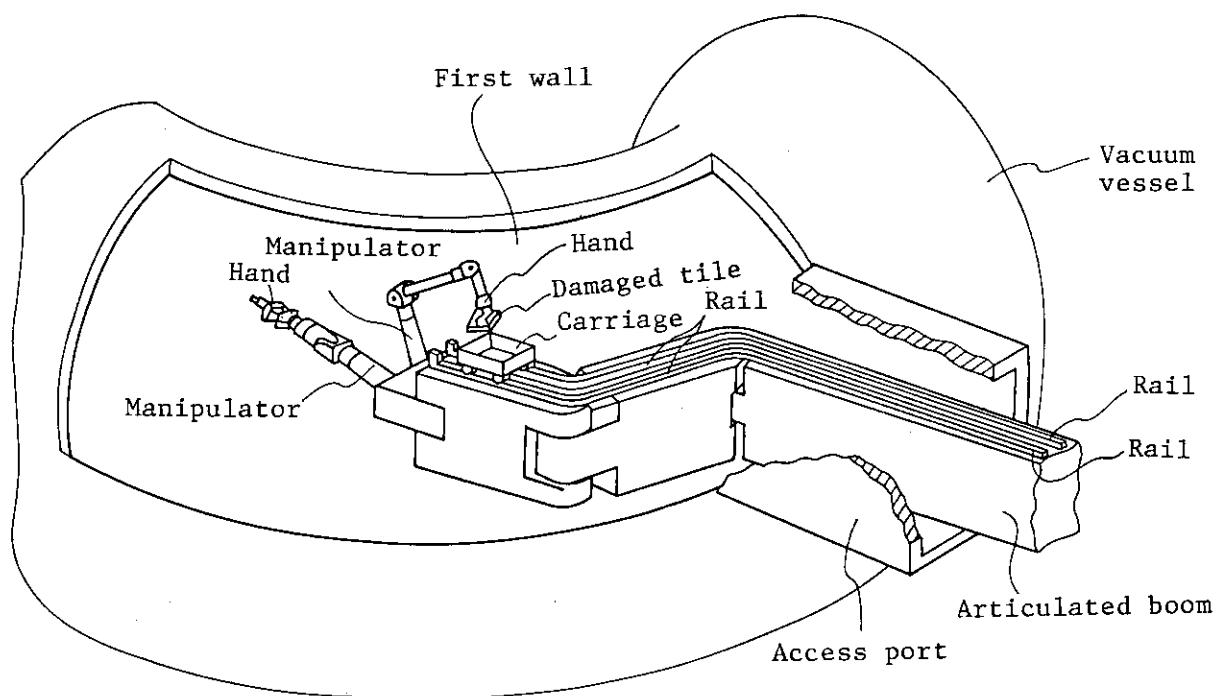


Fig. 6.2.2 Damaged tile transport system.

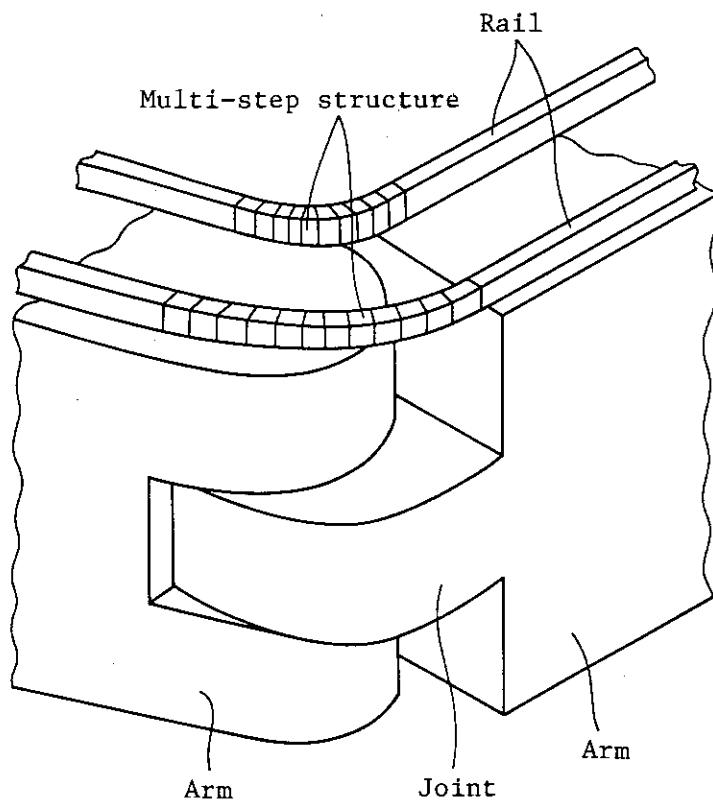


Fig. 6.2.3 Flexible rail structure at boom joint.

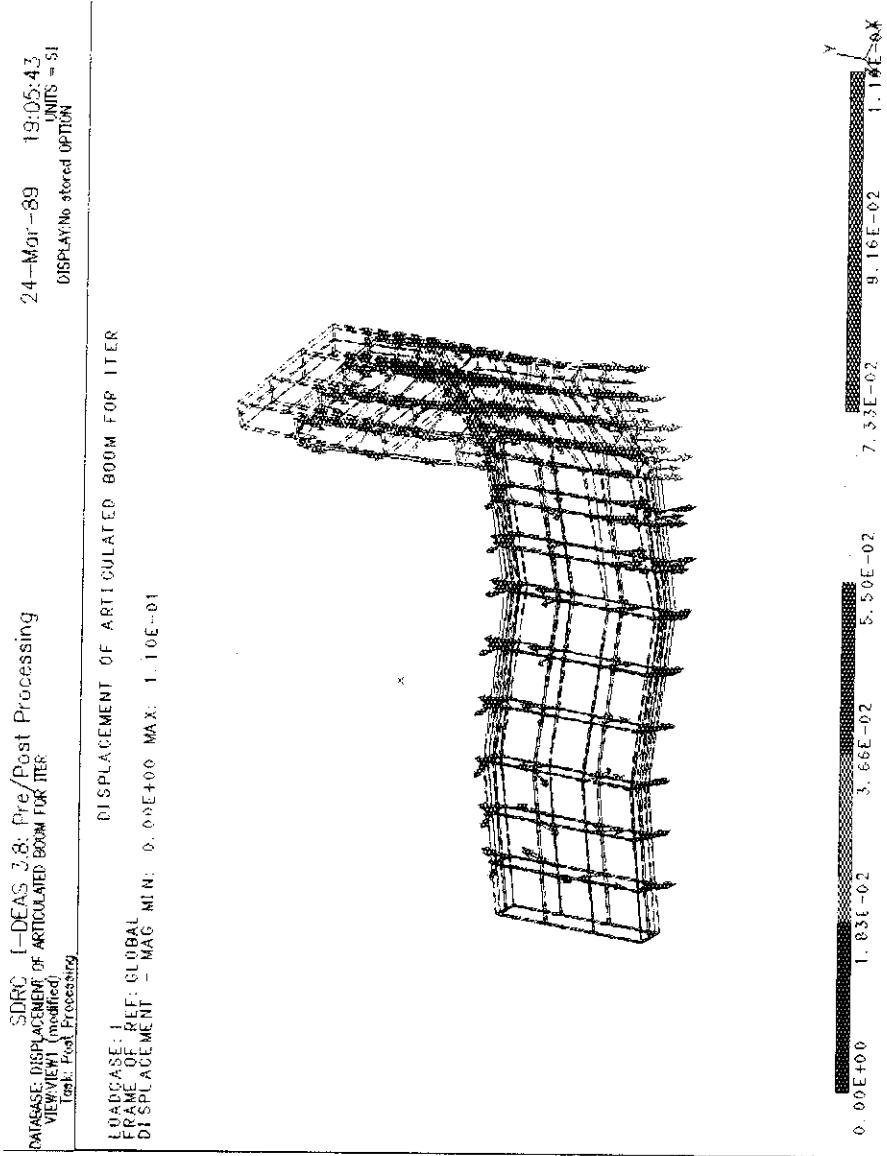


Fig. 6.2.4 Displacement of ITER Articulated Boom
 (Bird's-eye view)

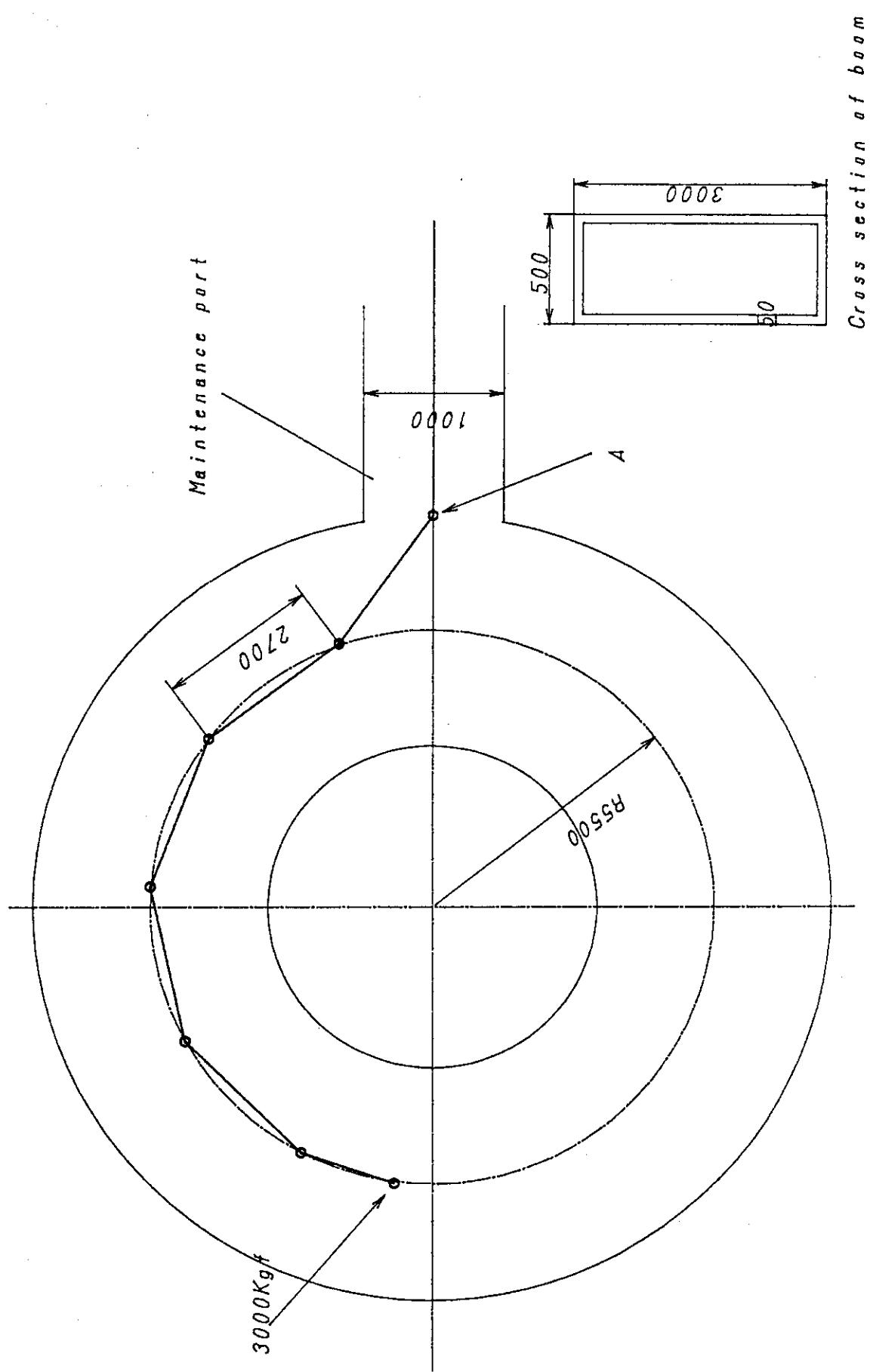


Fig. 6.2.5 Analytical model for ITER articulated boom.

DISPLACEMENT OF ARTICULATED BOOM FOR ITER
DISPLACEMENT - MAG MIN: 0.00E+00 MAX: 1.10E-01

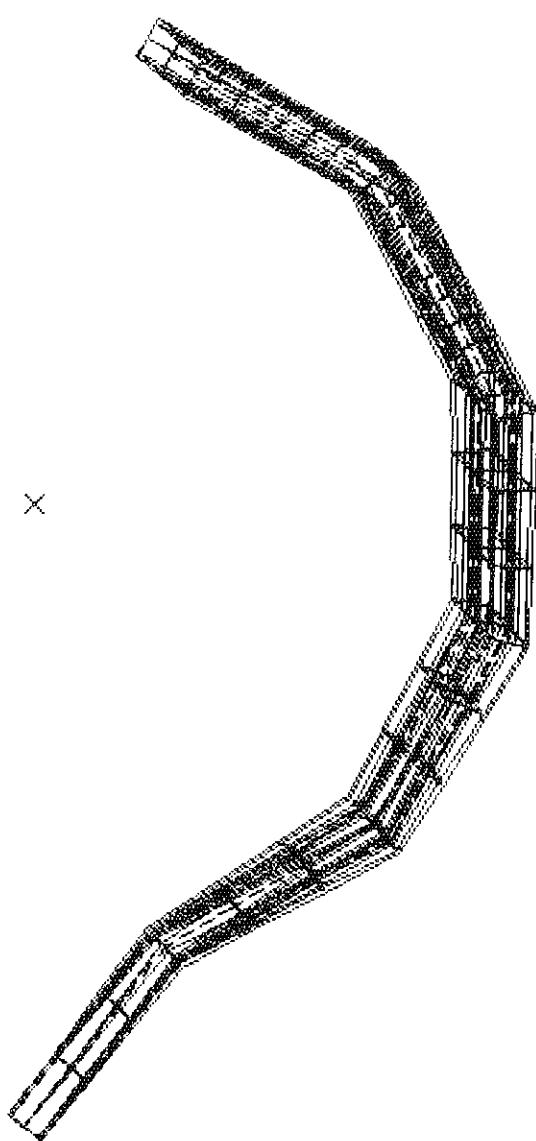


Fig. 6.2.6 Displacement of ITER Articulated Boom
(Plan view)

7. 壁の健全性点検法

アーマータイルを修理交換する原因から以下の3つが考えられる。

(1) タイルの溶融あるいは比較的大きな傷、クラック

視覚センサを用いて同時に多数のタイルをチェックする。視覚センサは画像カメラが望ましいが耐放射線性の観点から光ファイバーセンサを10~100時間で使い捨てでしょう。

(2) 微小クラック

現状では、どの程度の亀裂でタイルを交換すべきかの判断基準がない。通常、溶接の欠陥等によく使われるものに超音波探傷がある。しかし、探触子をタイル表面に当てても微少な隙間ができる、超音波が伝わらないので、隙間を水などでなくす必要がある。もちろん真空容器を汚染しないという観点からなんらかの工夫が必要となる。

(3) ポルトの緩み

① タイルをたたいて音の違いから判断する。

② トルクリミタにより最適締付トルクになるまで、全てのタイルを締めする。

③ ポルト頭部に超音波探触子を当ててトルクを測定する。

8. ま　と　め

第1壁健全性とその容易交換法の調査・検討を行った。調査の結果は、JET, TFTR の実績からEC, 米国が日本より一步先んじていることが判った。しかし、日本はこの分野では基礎的な技術を有しており、また近い将来の核融合実験炉（FER）の建設を考えた場合、炉本体構造と遠隔操作技術が十分に整合性がとれていなければならない。そういう観点から本報告書に示した新しいタイル取付構造と交換に必要なシステムは、今後更に深く検討を行い、部分的な試作・実験を行い FER 建設のための 1 つのデータベース（経験）となれば非常に有効なものとなろう。

7. 壁の健全性点検法

アーマータイルを修理交換する原因から以下の3つが考えられる。

(1) タイルの溶融あるいは比較的大きな傷、クラック

視覚センサを用いて同時に多数のタイルをチェックする。視覚センサは画像カメラが望ましいが耐放射線性の観点から光ファイバーセンサを10~100時間で使い捨てでしょう。

(2) 微小クラック

現状では、どの程度の亀裂でタイルを交換すべきかの判断基準がない。通常、溶接の欠陥等によく使われるものに超音波探傷がある。しかし、探触子をタイル表面に当てても微少な隙間ができる、超音波が伝わらないので、隙間を水などでなくす必要がある。もちろん真空容器を汚染しないという観点からなんらかの工夫が必要となる。

(3) ボルトの緩み

① タイルをたたいて音の違いから判断する。

② トルクリミタにより最適締付トルクになるまで、全てのタイルを増締めする。

③ ボルト頭部に超音波探触子を当ててトルクを測定する。

8. ま　と　め

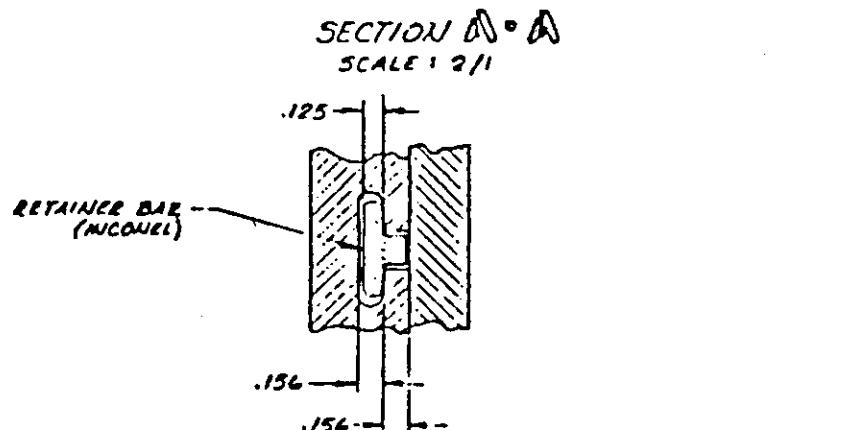
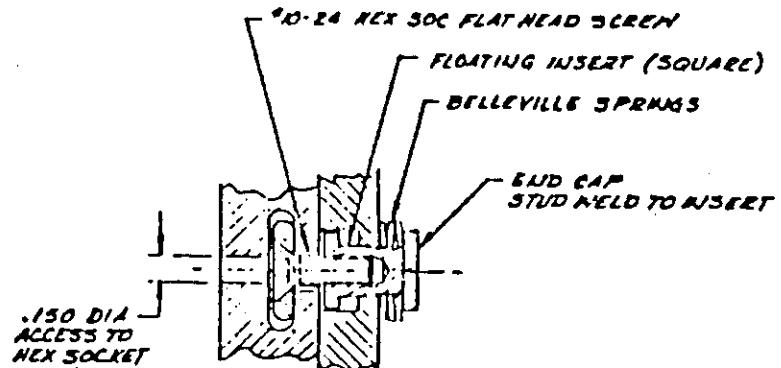
第1壁健全性とその容易交換法の調査・検討を行った。調査の結果は、JET, TFTR の実績からEC, 米国が日本より一步先んじていることが判った。しかし、日本はこの分野では基礎的な技術を有しており、また近い将来の核融合実験炉（FER）の建設を考えた場合、炉本体構造と遠隔操作技術が十分に整合性がとれていなければならない。そういう観点から本報告書に示した新しいタイル取付構造と交換に必要なシステムは、今後更に深く検討を行い、部分的な試作・実験を行いFER建設のための1つのデータベース（経験）となれば非常に有効なものとなろう。

参 考 文 献

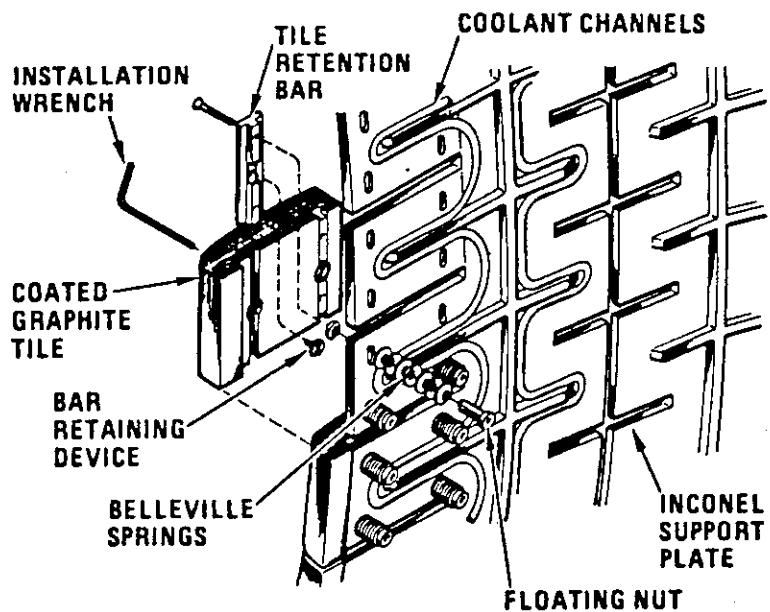
- (1) A.C. Rolfe, "Assembly and Remote Maintenance of JET", ITER Specialists' Meeting on Assembly, Maintenance and Reactor Configuration, 11-15, July, 1988, Garching, FRG.
- (2) T. Raimondi, "Design and Operation of Remote Maintenance System in JET", JET-P(87)02.
- (3) K. Sonnenberg, et al., "Wall Concepts and Density Control for JET", 14th SOFT, 1986.
- (4) P.J. Heitzenroeder, "TFTR In-Vessel Maintenance", ITER Specialists' Meeting on Assembly, Maintenance and Reactor Configuration, 11-15, July, 1988, Garching, FRG.
- (5) 小林武司ら：核融合次期装置設計（昭和61年度設計報告書），JAERI-M87-139, (1987)
- (6) 小林武司ら：核融合次期装置設計（昭和61年度設計報告書），JAERI-M87-138, (1987)
- (7) FER設計チーム，炉本体グループ（私信）
- (8) L. Sevier, et al., "TFTR Bumper Limiter Design", 10th SOFE, 1983.
- (9) R. Gallix, et al., "CIT Vacuum Chamber Conceptual Design and Analysis", 14th SOFT, 1986.
- (10) H.W. Kugel, et al., "The Design of the Poloidal Divertor Experiment Tokamak Wall Armor and Inner Limiter System", Nuclear Technology/Fusion, Vol.2(Oct. 1982).
- (11) M. Kondoh, et al., "Application of SMAs to Pipe Connections, Mechanical Connections, Vacuum Seals and Jack Systems", IAEA Technical Committee Meeting on Robotics and Remote Maintenance Concepts for Fusion Machines, 22-24 February, 1988, Karlsruhe, FRG.
- (12) N. Nishikawa, et al., "Fundamental Behavior of a Shape Memory Alloy Coupler for Quick Replacement Handling of Fusion Core Parts in Cassette Compact Toroid Reactor", 14th SOFT, 1986.
- (13) T. Hosoya, et al., "Neutron Irradiation Behavior in Ti-Ni Shape Memory Alloys", ICOMAT-86.
- (14) D. Maisonnier, "Vehicle Concept for NET In-Vessel Inspection and Maintenance", IAEA Technical Committee Meeting on Robotics and Remote Maintenance Concepts for Fusion Machines, 22-24 February, 1988, Karlsruhe, FRG.

付録 アーマータイル構造設計例の補足資料（図面集）

この付録は、本文中の Table 2.2.1(1)~(7)の図及び説明を補足するために添付したものである。

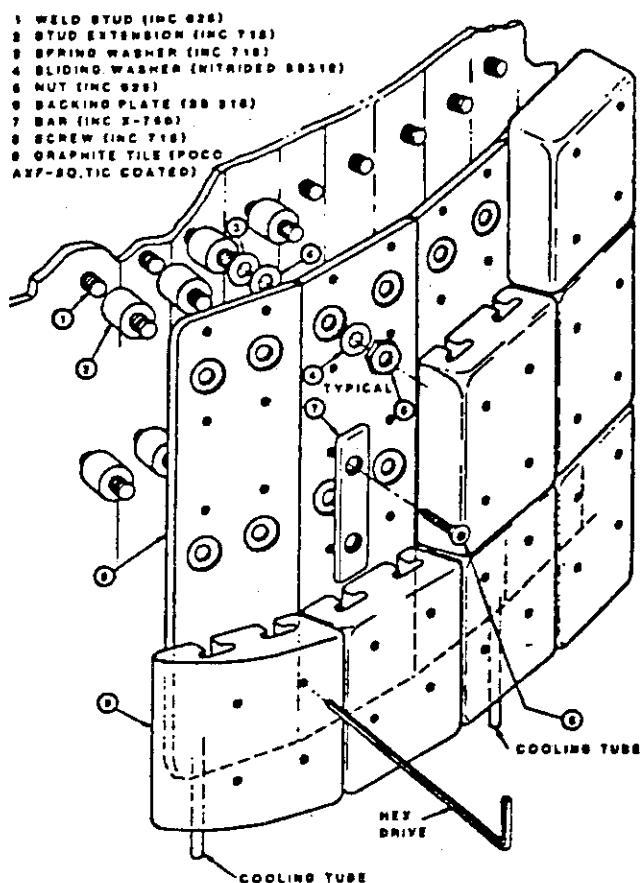


SECTION B-B
SCALE: 2/1



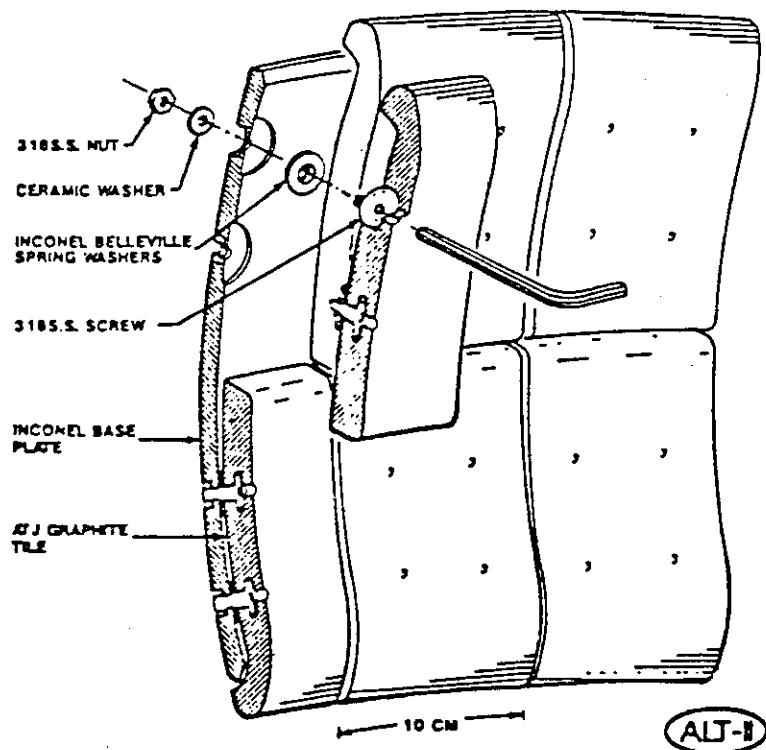
Assembly of Graphite Tiles on the Bumper Limiter, Rear View

1. TFR bumper limiter.



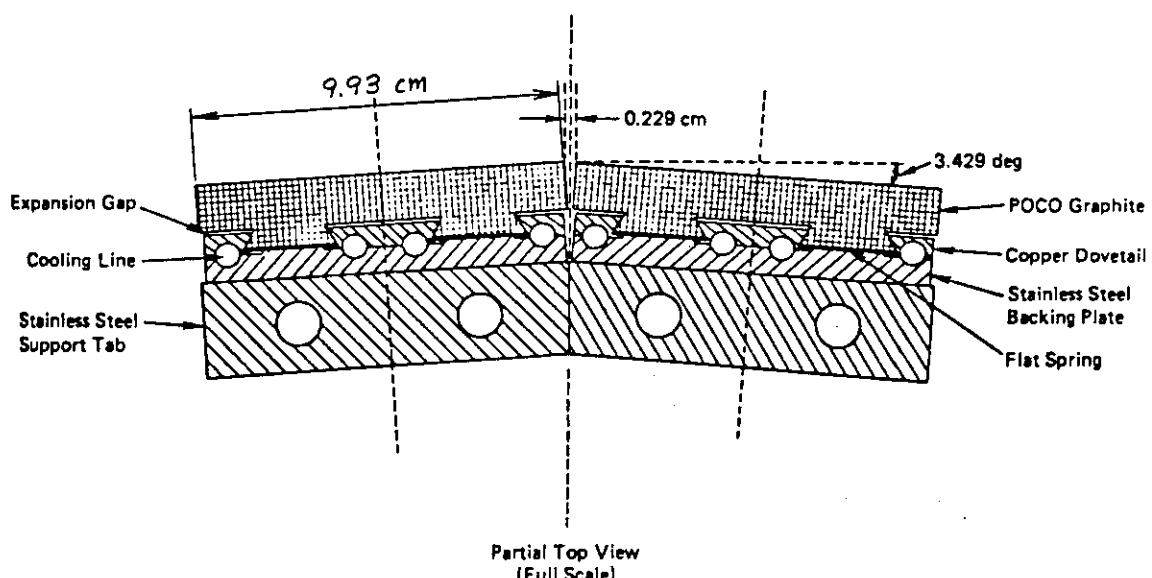
2. D-3 NBI armour/limiter.

ALT-II TILE ATTACHMENT



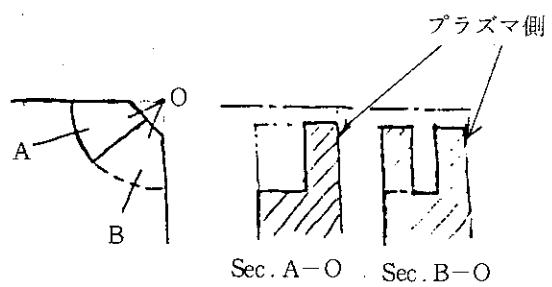
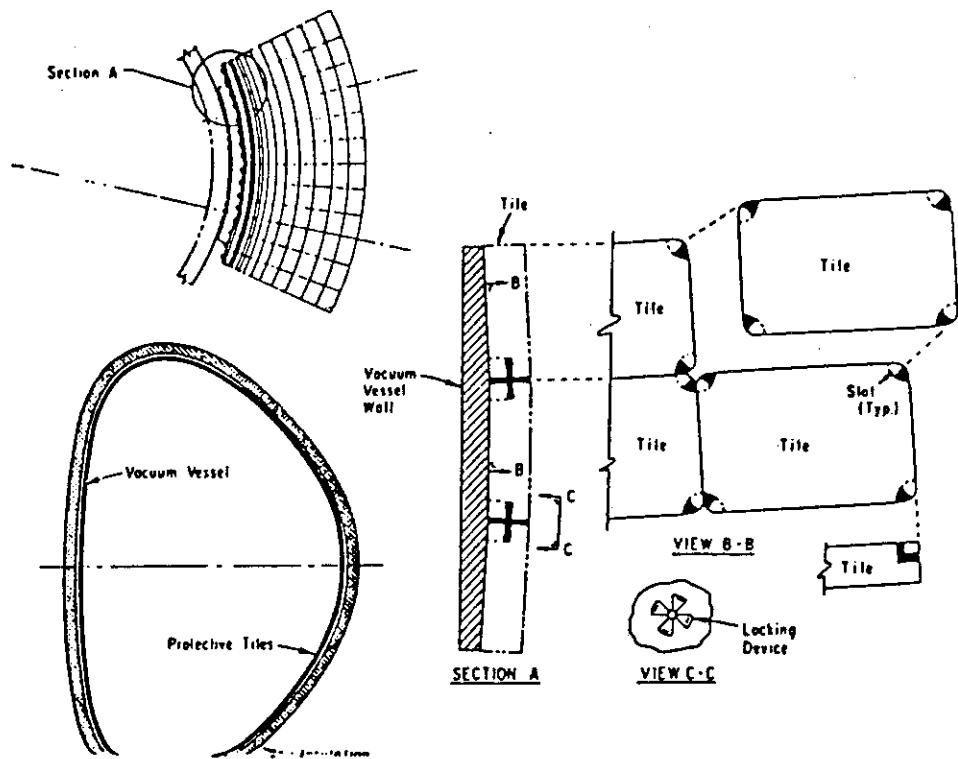
3. ALT-II.

Graphite-Slat Alignment



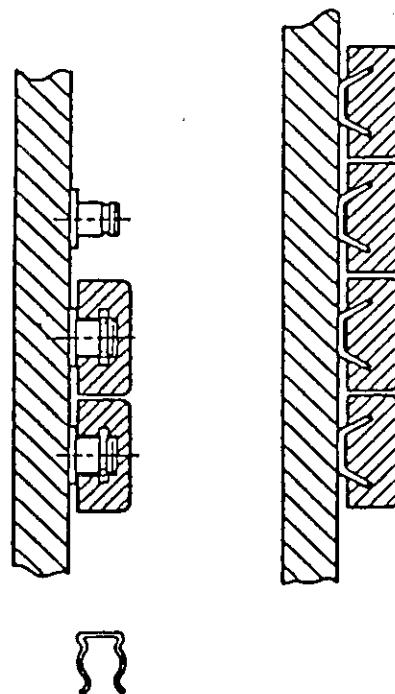
Partial schematic cross-section end view of the final graphite tile and backing plate alignment.

4. PDX.



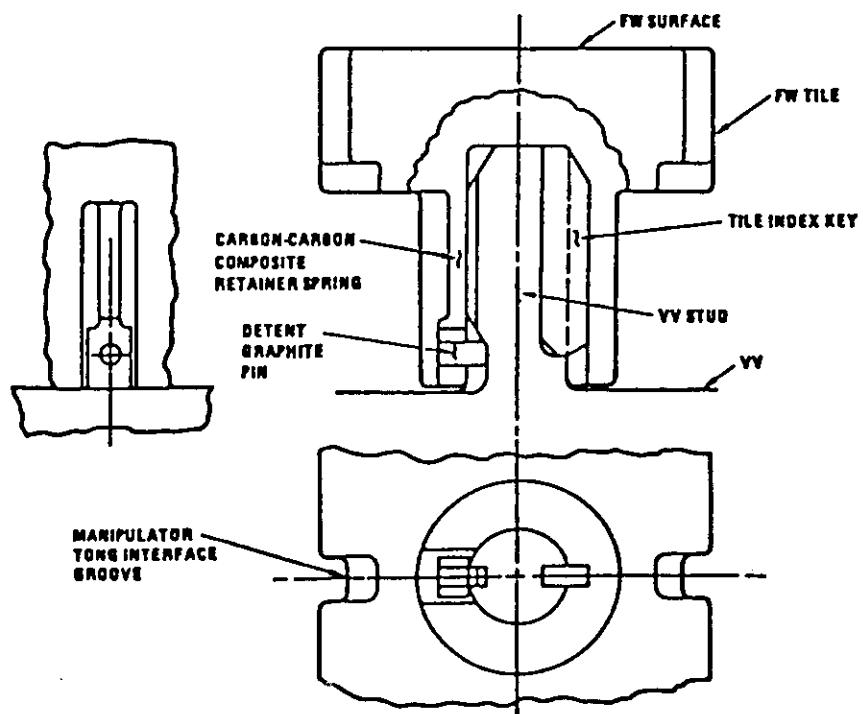
5. ISP.

LITE - Tiles Attachment Options

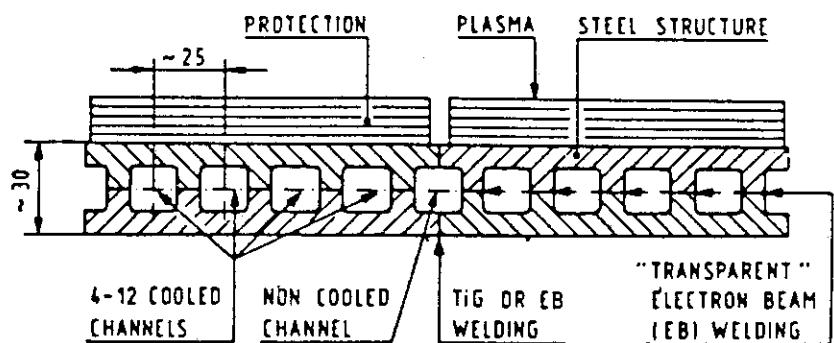


6-1. LITE.

Graphite Tile with Carbon-Carbon Composite Retainer

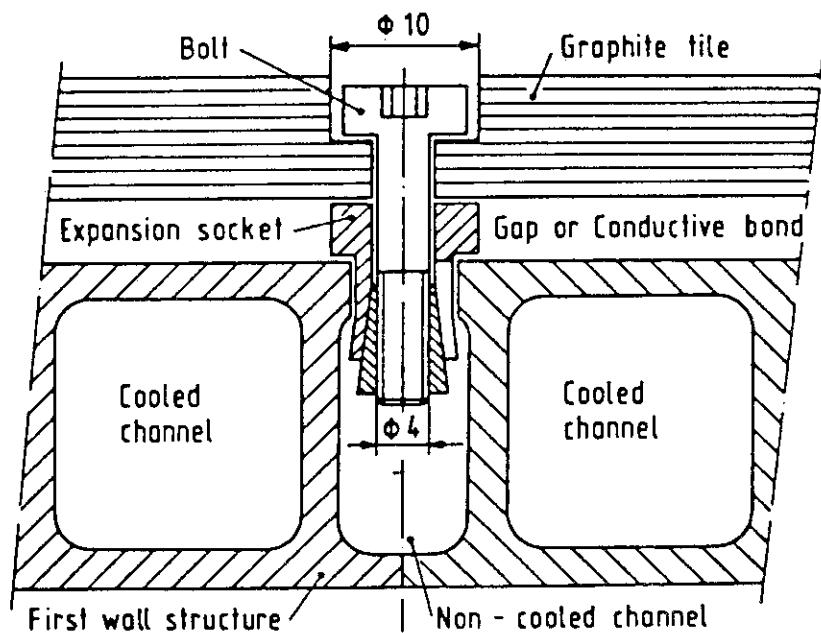


6-2. LITE.



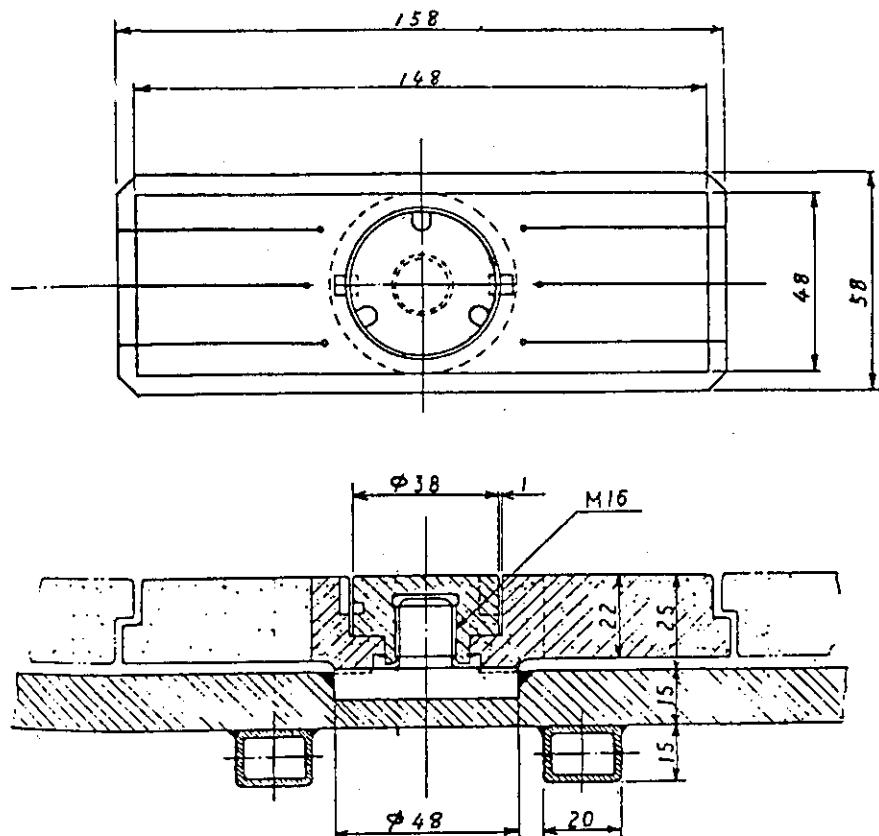
Concept for FW panel based on
transparent electron beam welding.

7-1. NET.

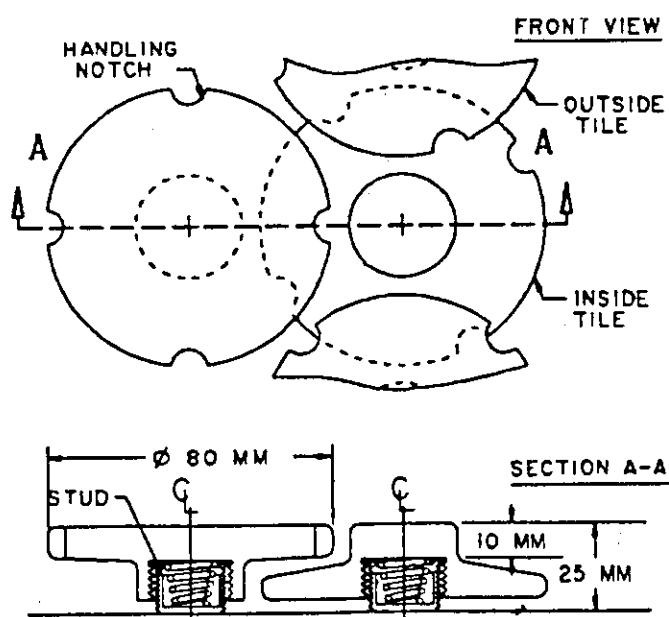


Mechanical attachment of graphite
tiles on the FW via refractory
metal bolts.

7-2. NET.



8. CIM.



First Wall Tile Arrangement

9-1. CIT.

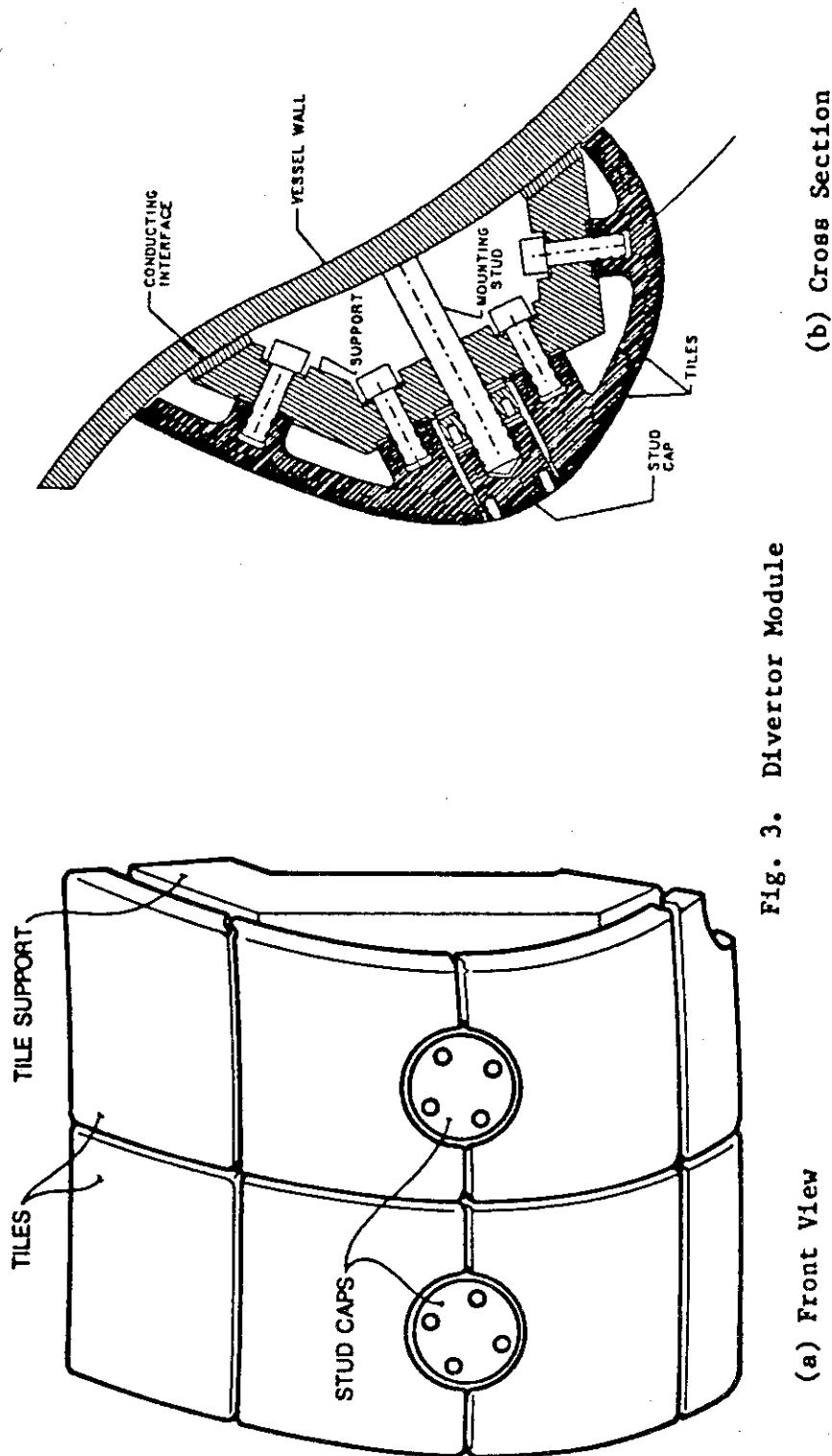
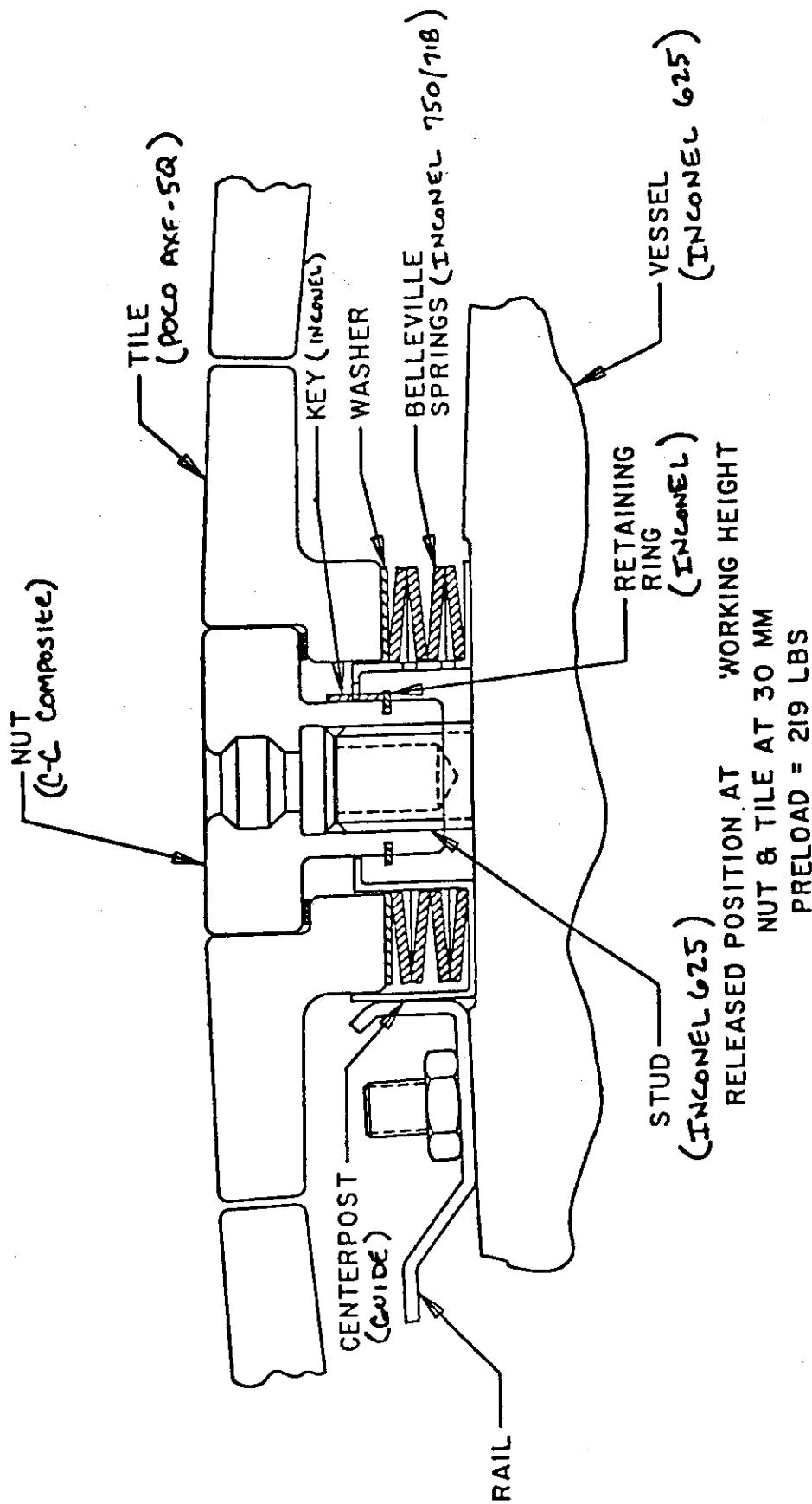


Fig. 3. Divertor Module

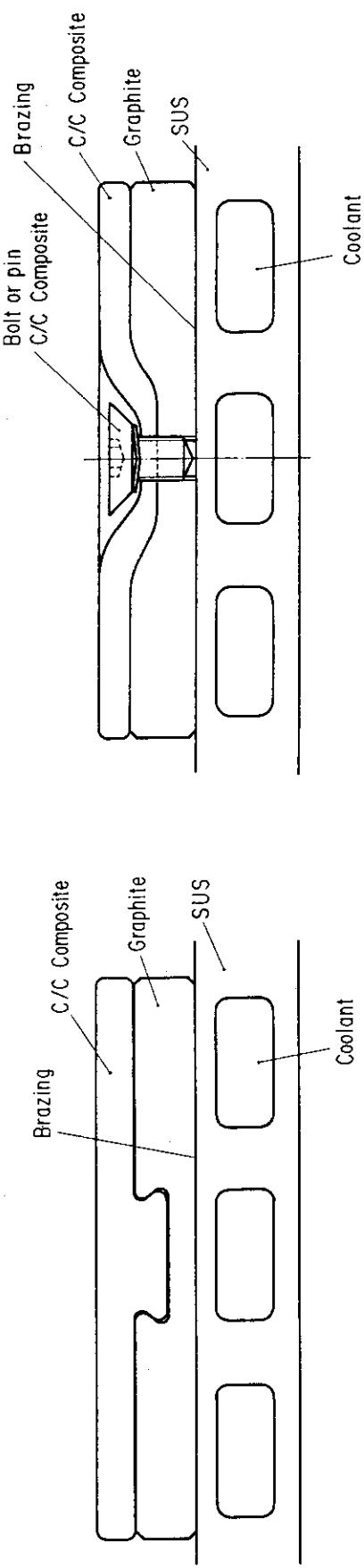
(a) Front View

(b) Cross Section

9-2. CIT.

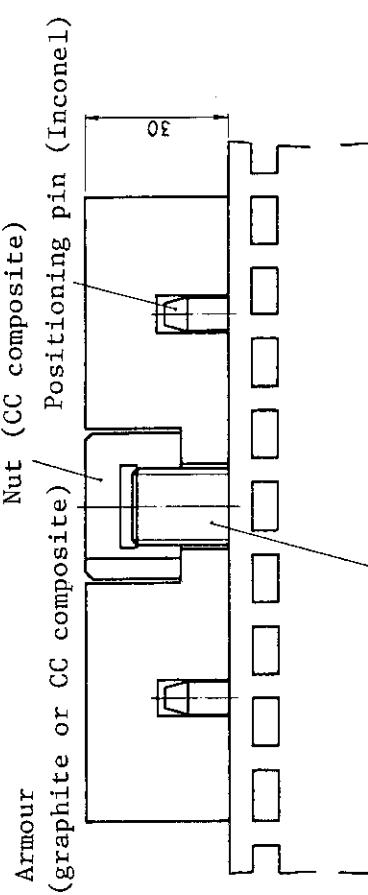


9-3. CIT.



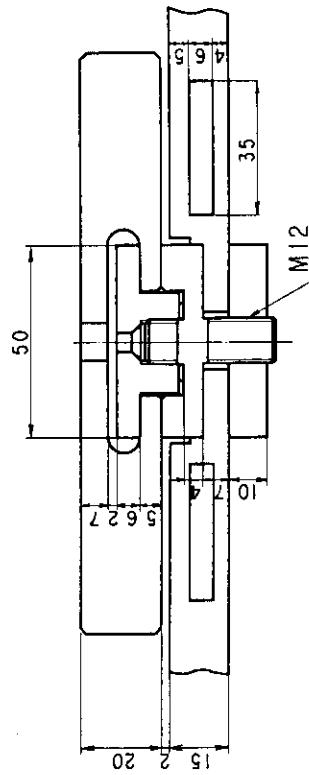
10-1. FER.

10-2. FER.

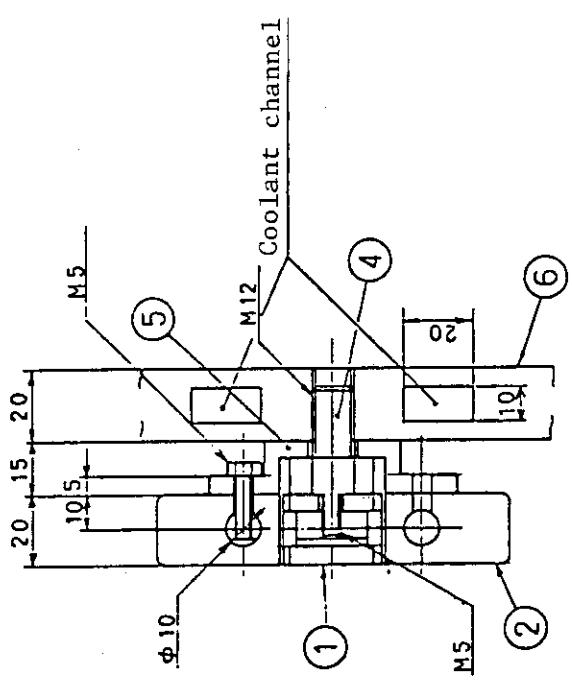


Stud bolt (SUS or Inconel)

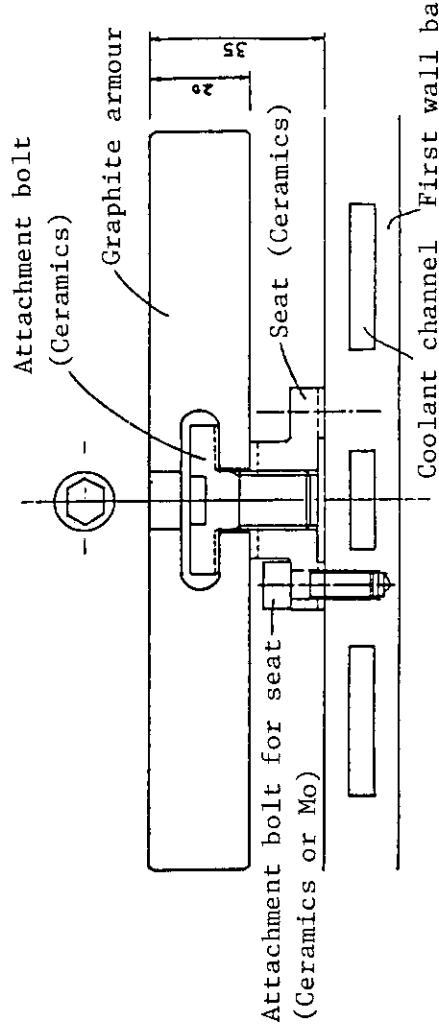
10-3. FER.



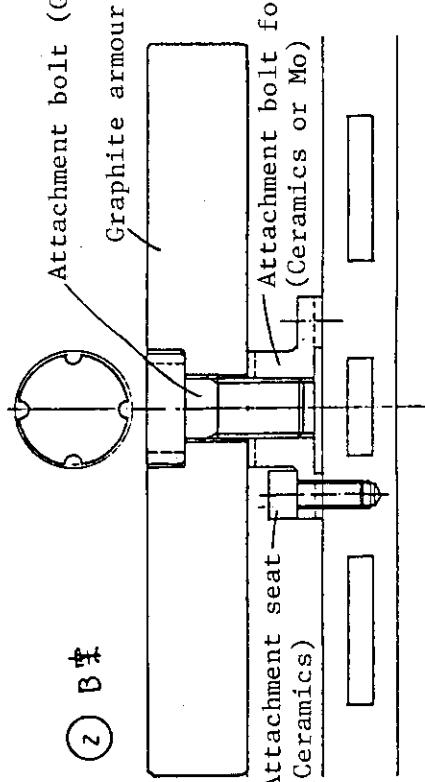
- 67 -



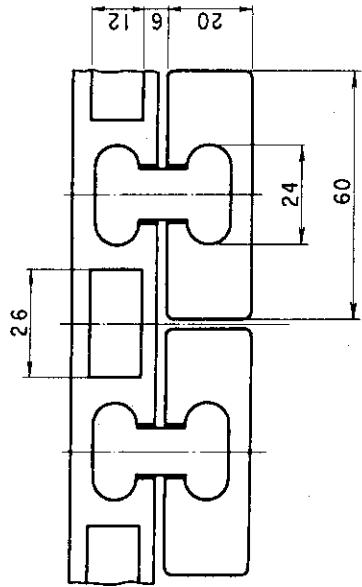
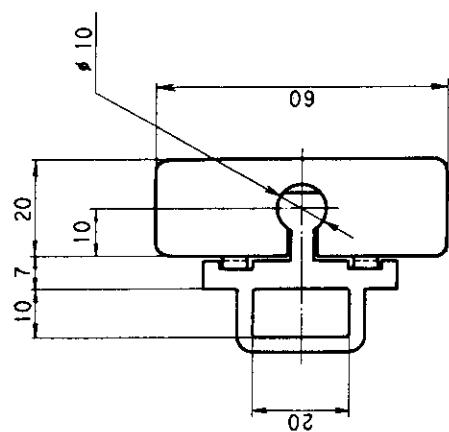
10-3. FER.



10-3. FER..



10-3. FER.



10-4. FER.

