

JAERI-M

7825

核融合実験炉分解修理の設計研究

1978年10月

核融合研究部炉設計研究室

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

核融合実験炉分解修理の設計研究

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
炉設計研究室

(1978年8月2日受理)

核融合実験炉の分解修理システムの設計研究を行なった。炉は8個の炉モジュールから構成されており、故障時にはその炉モジュールを炉室から修理室へ移送し、修理作業を行なう。

主な検討内容は、修理方法に関する設計、炉解体設備（天井クレーン、自動溶接切断装置、遠隔操作装置）、炉モジュール移送設備（引出用台車、旋回用台車）およびブランケット修理設備に関する設計、炉の耐震解析、炉室および修理室に関する検討、放射性廃棄物処理方法の検討、分解修理に要する期間と人員の推定等である。

本設計研究の結果、分解修理システムとしては一応完成されたが、ブランケット冷却配管結合部、自動溶接切断装置、炉体分解時の耐震強度に関しては更に検討する余地が残されている。

本報告書は住友重機械工業株式会社が原研からの委託によって行なった設計研究の成果である。

(契約番号 52年度 サ-0053)

Repair/Maintenance Design for Tokamak
Experimental Fusion Reactor
Fusion Reactor System Laboratory
Division of Thermonuclear Fusion Research
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received August 2, 1978)

Repair and maintenance design for JXFR has been studied. The reactor is in eight modules so that a damaged module alone can be separated from the other modules and transferred from the reactor room to a repair shop.

Design work covers overhaul procedure, dismounting equipments (overhead cranes, auto welder/cutter and remote handling equipments), transport system of a module (module mounting carriages and rotating carriage), repair equipment for blanket, earthquake-proof analysis of the reactor, reactor room structure, repair shop layout, management of radioactive wastes, time and the number of persons required for overhaul etc.

Though the repair and maintenance system is almost complete, there still remain problems for further study in joints of blanket cooling piping, auto welder/cutter and earthquake-proof strength in reactor disassemblage. More detailed studies and R & D are necessary for engineering perfection.

KEY WORDS: Tokamak Reactor, Experimental Fusion Reactor, Disassembling, Reassembling, Repair, Maintenance, Module Transport System

目 次

まえがき	1
1. 分解修理システムの設計	2
1.1 設計条件	2
1.1.1 炉の仕様と炉の概念図	2
1.1.2 炉モジュールの概算重量	2
1.1.3 放射線管理と遮蔽	6
1.2 分解修理システム	13
1.2.1 故障と修理の概念	13
1.2.2 分解修理手順	15
2. 炉の分解および組立作業	21
2.1 炉モジュール解体前の準備作業	21
2.2 炉モジュールの再組立	32
3. 分解修理装置の設計	36
3.1 引出用台車	36
3.2 旋回用台車	48
3.3 天井クレーン	76
3.4 遠隔操作装置	82
3.5 自動溶接機	93
3.6 溶接部の検査法	97
3.7 ブランケット修理装置	106
4. 炉の構造設計	111
4.1 炉の耐震解析	111
4.2 炉の据付方法	122
4.3 ブランケットの支持固定方法	123
4.4 ブランケット結合機構とその処理	132
5. 建屋に関する検討	145
5.1 炉室の耐震強度	145
5.2 旋回台車軌道の床強度	150
5.3 遮蔽扉の設計	152
5.4 修理室	168
5.5 建屋全体	177
6. 分解修理に関する安全対策	182
7. 放射線廃棄物処理対策	186
8. まとめ	194

8.1	分解修理所要時間と人員	194
8.2	問題点及び開発課題	201
8.3	結 語	202
9.	追補（その他の修理方法）	205

CONTENTS

FOREWORD	1
1. OVERHAUL SYSTEM DESIGN	2
1.1 Design Condition	2
1.1.1 Specification and Conceptual Figure of JXFR	2
1.1.2 Estimated Weight of the Module	2
1.1.3 Radiant Rays Control and Shield	6
1.2 Overhaul System	13
1.2.1 Concept of Accident and Repair	13
1.2.2 Overhaul Procedure	15
2. DISASSEMBLING AND REASSEMBLING OF THE REACTOR	21
2.1 Preliminary Work before Disassembling the Reactor	21
2.2 Reassembling of the Reactor	32
3. CONCEPTUAL DESIGN OF FACILITIES AND EQUIPMENTS FOR OVERHAUL ...	36
3.1 Module Mounting Carriage	36
3.2 Rotating Carriage	48
3.3 Overhead Crane	76
3.4 Remote Control Equipment	82
3.5 Auto Welder	93
3.6 Weld Test	97
3.7 Repair Equipment for Blanket	106
4. CONCEPTUAL DESIGN OF THE REACTOR STRUCTURE	111
4.1 Earthquake-proof Analysis of the Reactor	111
4.2 Fixed Method of the Reactor	122
4.3 Fixed Method of Blanket Support	123
4.4 Connecting Method of Blanket Piping	132
5. INVESTIGATION FOR THE REACTOR BUILDING	145
5.1 Earthquake-proof Strength of the Reactor Room	145
5.2 Floor Strength of the Rotating Carriage Railway	150
5.3 Conceptual Design of the Shield Door	152
5.4 Repair Shop	168
5.5 Reactor Building	177
6. SECURITY COUNTERMEASURE FOR OVERHAUL	182
7. COUNTERMEASURE FOR RADIOACTIVE WASTE	186
8. CONCLUSION	194
8.1 Time and the Number of Persons Required for Overhaul	194
8.2 Research and Development	201

8.3 Conclusion	202
9. ANOTHER REPAIRING METHOD	205

ま え が き

本設計報告書は、日本原子力研究所核融合研究部炉設計研究室殿御計画の出力100 MWのトカマク型核融合実験炉の分解修理に関するものである。

同研究所の基本設計(JAERI-M 7300)に基づき、炉を8分割して、故障時にその1モジュールを修理室に取り出し修理を行なうことについてその可能性の検討を行ない、またそれに必要な設備と規模の検討を行なった。

解体を伴う故障の中で最も起こりやすいのは、ブランケット損傷であり、ブランケットを修理あるいは取り替えるためには、炉全体の中から1モジュールの結合を解き、それを放射状に引き出し修理室へ導く。この方法を検討することにより、他のあらゆる故障が生じた場合でも対応できるものと思われる。

また、分解修理の面からみた炉の構造および建屋構造、レイアウトに関しても検討を行なった。その他、放射性廃棄物処理対策などについても述べ、分解修理に伴う全体的な流れに関し検討を加えた。

最後に分解修理にかかる時間を推定するとともに、今後の問題点および開発項目をとりあげ、まとめとした。

1. 分解修理システムの設計

1.1 設計条件

1.1.1 炉の仕様

故障修理の対象として想定する核融合炉は、日本原子力研究所の設計による融合反応出力100 MWの準定常炉とする。

その外形構造をFig. 1.1, 1.2に、主要設計パラメータをTable 1.1に示す。また、実験炉設計上の設定条件を下記に示す¹⁾。

- (1) 融合反応出力100 MWの準定常炉とする。
- (2) 炉寸法はできるだけコンパクトにする。
- (3) 熱核融合を主とし、自己点火条件に近づける。
- (4) トロイダル磁束密度は最高値を12 T (テスラ) 以下に抑える。
- (5) プラズマ断面は円形とする。
- (6) リミタは機械式とする。
- (7) ブランケットは遮蔽を主目的とするがトリチウムはできるだけ多量に再生産する。
- (8) ブランケットはLi₂O-He冷却方式とする。
- (9) ブランケット材料容器はSUS316とする。
- (10) プラズマに面する壁面はCまたはSiCとする。
- (11) トロイダルコイルにはNb₃Sn等の化合物系超電導線材を用いる。
- (12) ポロイダルコイルも超電導とする。

但し(10)に関しては、最近、Cはケミカルスパッタリングのため使えそうもないと考えられるに至った。優れた特性を持つ低Z材料の開発が要望される。

1.1.2 炉モジュールの概算重量

炉モジュールの重量を概算すると、Table 1.2のようになる。1モジュールあたりの重量としては、約4000トン。炉全体の重量としては、約32000トンと見積ることができる。

但し、故障したモジュールを移送する場合は、先にNBIを取り出すので、旋回台車に載せられる最大荷重は、NBIを除いたあとのコンポーネント重量、即ち約3000トンと推定できる。

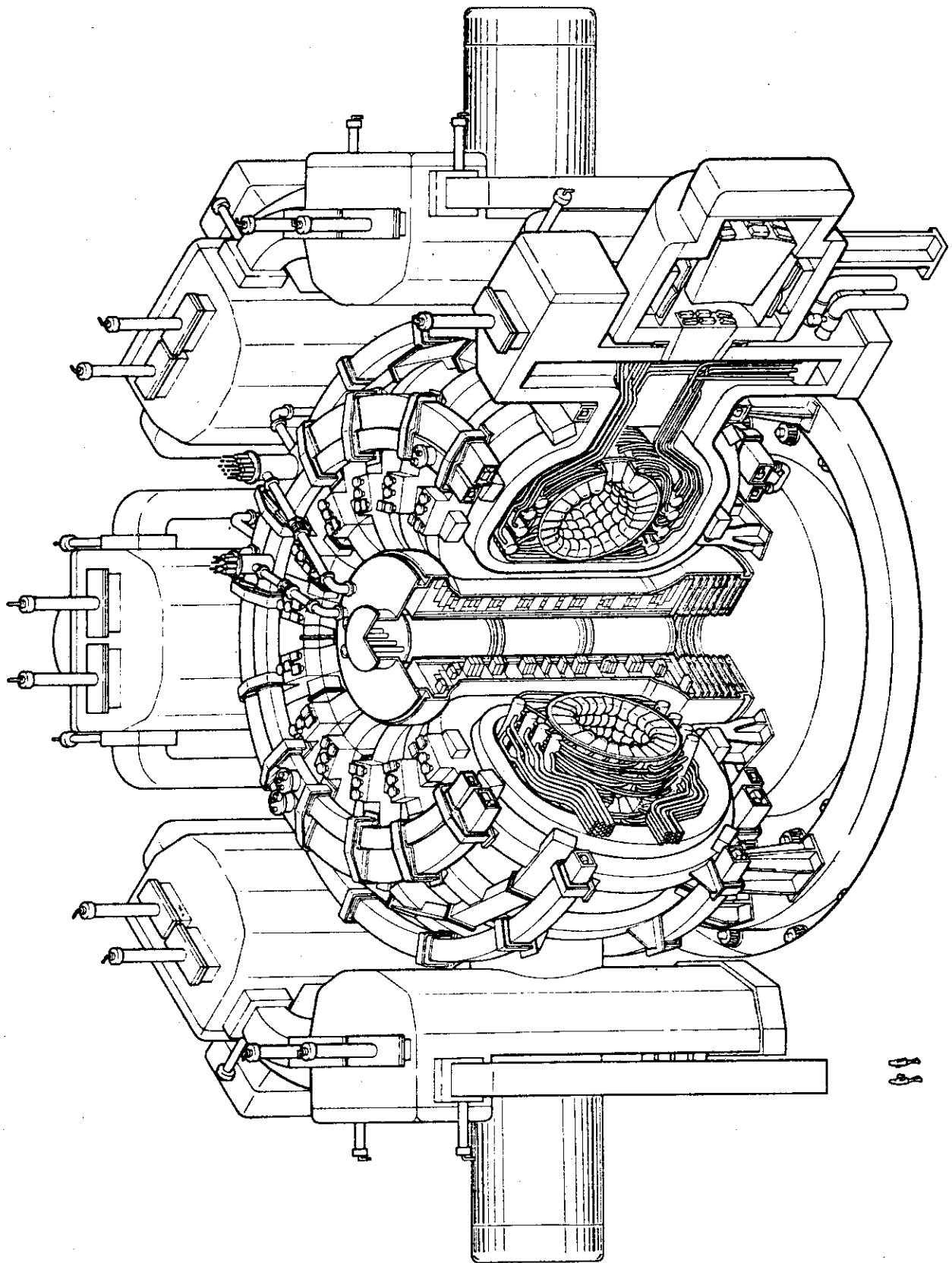


Fig. 1.1 Overview of the JXFR

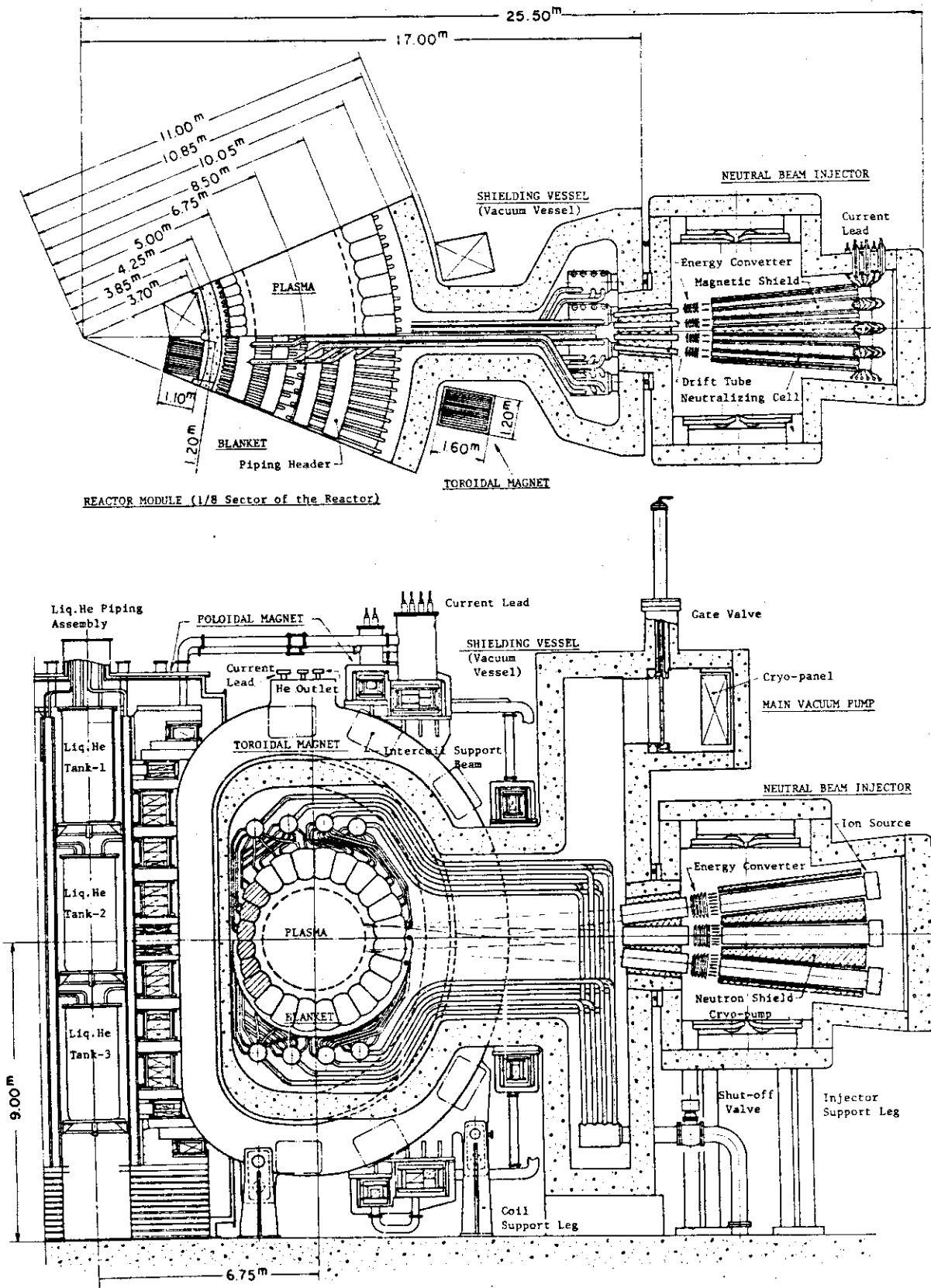


Fig. 1.2 Cross-sectional view of the JXFR

Table 1.1 Main design parameters of the JAERI Experimental Fusion Reactor (JXFR)

Operation Mode		Toroidal field magnet	
Fusion power (MW)	100	Number of coils	16
Operation period(s)	420	Bore, Width/Height (m)	7/11
Burn time(s)	300	Magnetomotive force (MAT)	203
Load factor	0.5	Max. field strength (T)	12
Duty factor	0.7	Stored energy (GJ)	60
Reactor dimensions		SCM material	Nb ₃ Sn
Major radius (m)	6.75	Refrigerator capacity (MW)	5.4
Plasma radius (m)	1.5	Primary winding	
First wall radius (m)	1.75	Number of coils	22
Plasma volume (m ³)	300	Magnetomotive force (MAT)	60
Plasma		Maximum field intensity (T)	8
Mean temperature (keV)	7	Stored energy (GJ)	2.1
Mean density (10 ¹⁴ cm ⁻³)	1.1	Flux change (Wb)	140
Effective charge	1.6	SCM material	NbTi
Confinement time (s)	2.9	Vertical field magnet	
Injection power (MW)	27	Number of coils	12
Toroidal field (T)	6	Magnetomotive force (MAT)	±8
Safety factor	2.5	Maximum field intensity(T)	8
Poloidal beta	2.2	Field intensity (T)	0.26
Toroidal beta	0.017	at plasma center	
Plasma current (MA)	4	Stored energy (GJ)	0.5
Reactor Structure		SCM material	NbTi
Reactor module/Reactor	8	Neutral beam injector	
Blanket cells/Reactor module	284	Number of ion sources	48
Injection and evacuation		Deuterium beam energy (keV)	200
hole/Reactor module	1	Ion beam output (MW)	240
Nominal max. 1st wall temp. (°C)	540	Injection power (MW)	33
Materials		Power efficiency	0.40
Structural material	316SS	Power supply (MW)	
Blanket fertile material	Li ₂ O	for Toroidal coils	0.6
Reflector material	Stainless steel	for Poloidal coils	6
Neutronics		for Refrigerator of SCM	
Neutron current at 1st wall (n cm ⁻² s ⁻¹)	7.6×10 ¹²	(Toroidal, Poloidal, IES)	12
Neutron wall loading (MW m ⁻²)	0.17	for Neutral beam injector	85
First wall displacement damage rate (dpa y ⁻¹)	1.1	for Vacuum exhaust system	
Max. helium production rate in 1st wall (appm y ⁻¹)	13	(Main pump, NBI pump)	3
Max. hydrogen production rate in 1st wall (appm y ⁻¹)	38	for Blanket cooling system	40
Tritium breeding ratio	0.9	for Auxiliary system	13
Nuclear heating per DT neutron (MeV n ⁻¹)	16.1	Total power	160
Total induced activity at one hour after shutdown (Ci) (after one year operation)	7.3×10 ⁷	Fuel circulation system flow rate(mgs ⁻¹)	
SCM irradiation effects		Tritium insertion rate	17.5
Max. copper displacement (dpa y ⁻¹)	9.0×10 ⁻⁶	Deuterium insertion rate	11.7
Max. nuclear heating rate (W cm ⁻³)	6.2×10 ⁻⁵	Helium exhaust rate	0.24
Total nuclear heating in MCW (kW)	0.68	Cooling system	
		Number of loops	4
		Coolant, Pressure (kg cm ⁻²)	He,10
		Inlet/Outlet temp. (°C)	300/500
		Flow rate (kg/s)	143
		Secondary system	He, air-cooled
		Tritium inventory (kg)	
		Fuel recirculating system	0.3
		Tritium recovery system including blanket	0.1
		Total inventory including storage	0.5

Table 1.2 実験炉コンポーネント重量

コンポーネント		1モジュール当りの重量(t)	炉全体の重量(t)
ブ ラ ン ケ ッ ト		2 5 0	2 0 0 0
遮 蔽	トロイダルコイル遮蔽	4 6 8	3 7 4 4
	接 続 部 遮 蔽	1 5 0	1 2 0 0
	ポ ー ト 部 遮 蔽	1 1 3 8	9 1 0 4
ト ロ イ ダ ル コ イ ル		8 9 4	7 1 5 2
N B I		9 3 1	7 4 4 8
ク ラ イ オ ポ ン プ		2 0 3	1 6 2 4
合 計		4 0 3 4	3 2 2 7 2

1.1.3 放射線管理と遮蔽

放射線管理というのは、原子力発電所に従事する人間および発電所周辺の住民に対し放射線障害を与えぬよう建屋内の換気および換気による汚染空気の外気への放出に対する処理など、十分安全性の高いものとして行なわねばならない。

核融合炉では、従来の原子力発電所或使用済核燃料の再処理工場と同等以上の厳しい放射線管理が要求される。

再処理工場の管理区域の指定に当っては、外部放射線の放射線量が50mRem/hrを越え、または越えるおそれのある場所をレッド区域、125mRem/hrを越え、または越えるおそれのあるものであっても50mRem/hrを越え、または越えるおそれのないアンバー区域、125mRem/hrを越え、または越えるおそれのないものをグリーン区域として区分している。また保全区域の場所であって管理区域に隣接し、特に管理を必要とする場所をホワイト区域として指定している²⁾。

従って核融合炉の場合にも同様の管理区域の指定を行ない、管理区域に関する出入りに際しては

- (1) あらかじめ定められた出入口以外通行させない。
- (2) 熱ルミネッセンス線量計等の個人被ばく線量計を着用させる。
- (3) 特別な作業衣、作業靴等を着用させる。
- (4) 必要に応じマスク、眼鏡等の防護具を着用させる。
- (5) 管理区域から退出するものについては、身体、衣服等の汚染の測定を行なう。

などの規定を設けなければならない。

そして人だけでなく物の運搬についても、管理区域から外へ持ち出す場合は、容器や機器等の除染を十分にしなければならない。(再処理施設においては、Table 1.3²⁾に定める基準を越えてはならない。)

また従業員等に係る許容被ばく線量はTable 1.4²⁾と設定する。但し緊急やむを得ない場合には、男子の従事者をその被ばく線量が1.2Remを越えない範囲において緊急作業に従事させることができるものとする。放射線管理用機器としては、Table 1.5²⁾のようなものがある。

建屋内の換気設備については、100%の予備を有し、換気設備の事故時においても常に炉建屋

内の換気を確保しなければならない。事故時には、建屋内の放射線レベルが上がり放射性物質の濃度が高くなる可能性があり、この場合には、換気は非常用排ガス処理装置に切換え、汚染空気を十分に処理した後、大気へ放出するようにしなければならない。換気を主体とする場合、給気はまず汚染低レベル区域に供給され、順次高レベル区域へ流れ、排気装置を通して外気へ放出される。この場合、十分な空気を供給し、大気放出に対し、十分に希釈され、規定された許容値を満足するようにしなければならない。また高レベル区域から低レベル区域に逆流しないように、高レベル区域を低レベル区域より負圧に保つなどの考慮がなされなければならない。

次に核融合実験炉の遮蔽について述べる。

遮蔽を考える場合に、装置遮蔽（ブランケットと超電導磁石用遮蔽層）と生体遮蔽（炉室の重コンクリート層）がある。

生体遮蔽については、建屋から遠く離れた位置におけるスカイシャイン放射線と建屋の直接透過放射線の影響を加味して遮蔽層の厚さなどを決めなければならない。

日本原子力研究所では、遮蔽層厚さの計算をFig. 1.3 の一次元計算モデルで検討を進めている。その計算結果の1例をTable 1.6 に示す¹⁾。

また、運転時における炉室内の線量率と停止時の誘導放射 γ 線の線量率をFig. 1.4, Fig. 1.5 に示す¹⁾。主な値をTable 1.7 にまとめた。

一般に作業者に対する許容線量率は、2.5 mRem/hr であるから、炉の運転中は絶対に立入ることは不可能である。

そして炉停止1週間後においても、トロイダルコイルの内側表面より15cmの深さの部分の線量率が2 mRem/hr¹⁾程度に高くなっており、さらに中性粒子入射孔周辺では、誘導放射能も十数倍になると予想されるので人の立ち入りは極力避けなければならない。但し、真空シールが破られる迄は、一定の制限のもとに作業員は一応炉室内に入り、各種の作業に従事できる。

しかし真空シールが破られた後は、炉室内作業はすべて自動遠隔操作によるマニピュレータで行なうことを考えなければならない。

Table 1.3 管理区域等からの物品の持ち出し制限

放射線量率		表面の放射性物質密度	
容器の表面	容器の表面から1m離れた位置	アルファ線を放出する放射性物質	アルファ線を放出しない放射性物質
200 ミリレム/時をこえてはならない	10ミリレム/時をこえてはならない。	$10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ をこえてはならない。	$10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ をこえてはならない。

(注1) 使用済燃料輸送用カスク等の表面の放射性物質密度については、

アルファ線を放出する放射性物質については、 $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ をこえてはならない。

アルファ線を放出しない放射性物質については、 $10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ をこえてはならない。

(注2) 梱包の表面において、放射性物質による汚染は検出されてはならない。

Table 1.4 従業員等に係る許容被ばく線量

	許 容 被 ば く 線 量		
	全身に対する被ばく	皮ふのみに対する被ばく	手, 前ばく, 足または足関節のみに対する被ばく
従 事 者	3レム/3ヶ月 および 5レム/年	8レム/3ヶ月 および 30レム/年	20レム/3ヶ月 および 75レム/年
随時立入者	1.5レム/年	3レム/年	
一時立入者 見学者等	0.5レム/年		

Table 1.5 放射線管理用機器

分類	測 定 機 器 名	測 定 線 種	測 定 台 数	測 定 項 目
定 置 式 モ ニ タ 設 備	ガンマ線エリヤモニタ	γ	64	管理区域内の必要個所に設置し, 管理区域内空間線量率を中央安全管理室の放射線監視盤によって監視する。
	中性子線エリヤモニタ	n	2	
	ベータ線ダストモニタ	β	17	排気口あるいは室内の空气中放射性物質濃度を測定し, 中央安全管理室の放射線監視盤によって監視する。
	プルトニウムダストモニタ	α	12	
	排気モニタ		1	
	ダストガスモニタ		1	
	臨界警報装置	$n \cdot \gamma$	3	臨界事故を監視する。
ク ロ ウ ド フ ツ ト モ ニ タ	アルファ線用ハンド・フットモニタ	α	14	管理区域出入口に設置し, 退出時の身体の表面汚染を測定するために使用する。
	ベータ・ガンマ線用 ハンド・フットモニタ	$\beta \cdot \gamma$	18	
サ ー ベ イ メ ー タ 類	アルファ線用 シンチレーション式サーベイメータ	α	20	GM管型, 比例計数管型, シンチレーション型, 電離箱型のサーベイメータで空間線量率, 表面汚染密度の測定に使用する。
	CM管式サーベイメータ	$\beta \cdot \gamma$	30	
	電離箱式サーベイメータ	$\beta \cdot \gamma$	20	
	遠隔操作型 ガンマ線用サーベイメータ	$\beta \cdot \gamma$	3	
	中性子線用サーベイメータ	n	2	
	ベータガンマ線用床モニタ	$\beta \cdot \gamma$	1	

Table 1.5 放射線管理用機器 (つづき)

分類	測定機器名	測定線種	測定台数	測定項目
放射線測定器類	2系統放射線測定装置	α $\beta(\gamma)$	3	各種試料の放射能測定に使用する。
	アルファ線用空気試料測定装置	α	1	
	ガンマ線用水試料測定装置	γ	1	
	多種波高分析装置	γ	1	
	ユニバーサル・スケータ	α $\beta(\gamma)$	2	
	可搬型放射線測定装置	α $\beta(\gamma)$	5	
	振動容量計電位計	放射性ガス	2	

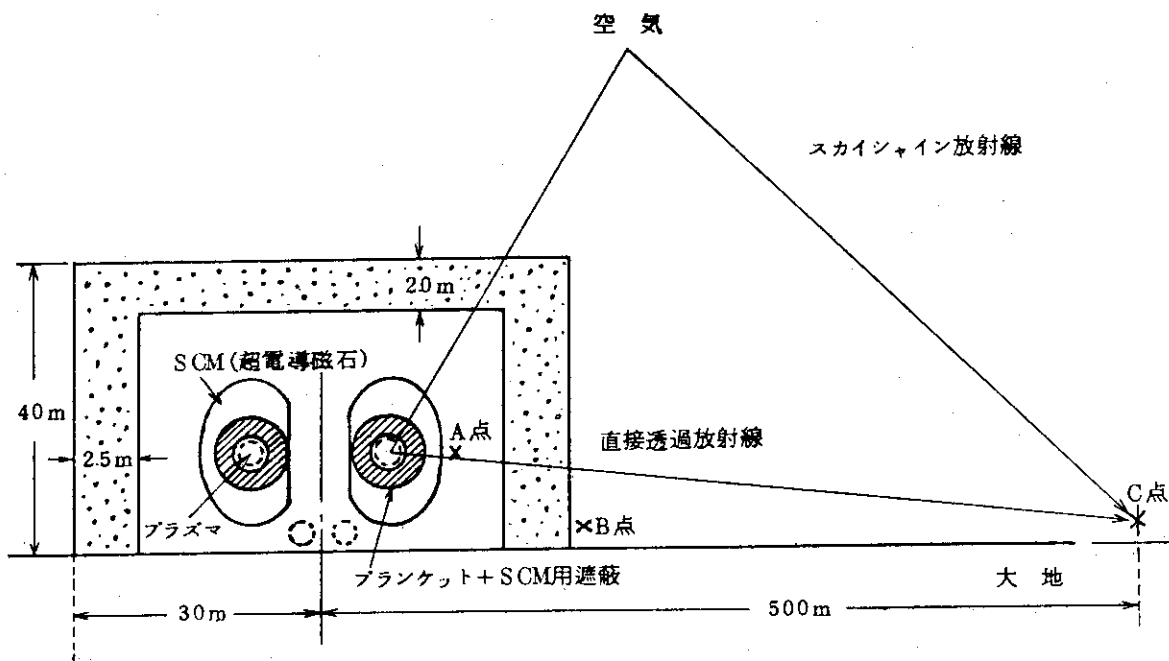


Fig. 1.3 実験炉の概略図

Table 1.6 Maximum dose rates at various positions in JXFR under various conditions

Conditions of JXFR and the types of radiations	Positions		
	In the reactor room (Point A) [mrem/h]	Outside the concrete wall (Point B) [mrem/h]	At the site boundary (Point C) [mrem/y]
<u>Operation</u>			
neutron	2.5×10^5	8.0×10^{-4}	5.1×10^{-3}
gamma-ray	1.2×10^3	1.1×10^{-4}	6.0×10^{-3}
total	2.5×10^5	1.9×10^{-3}	1.1×10^{-2}
<u>One week after shutdown</u>			
(i) <u>Scheduled shutdown</u>			
induced gamma-ray	0.7	-	-
(ii) <u>One module</u>			
<u>extracted for</u>			
<u>repair</u>			
induced gamma-ray	$10^7 \sim 10^8$	10^{-4}	-

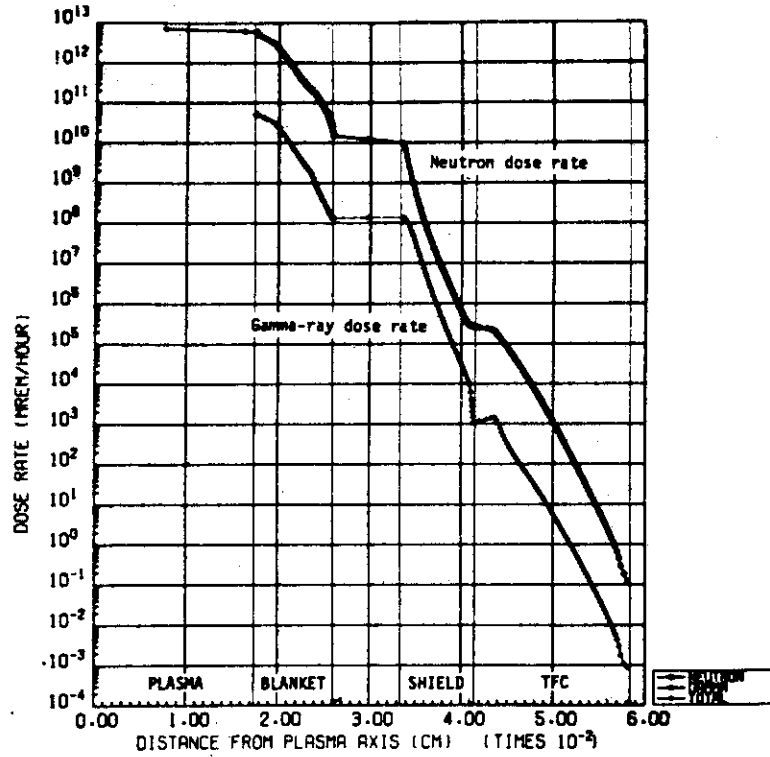


Fig. 1.4 Data rate distribution in the blanket, shield and magnet at the reactor operation

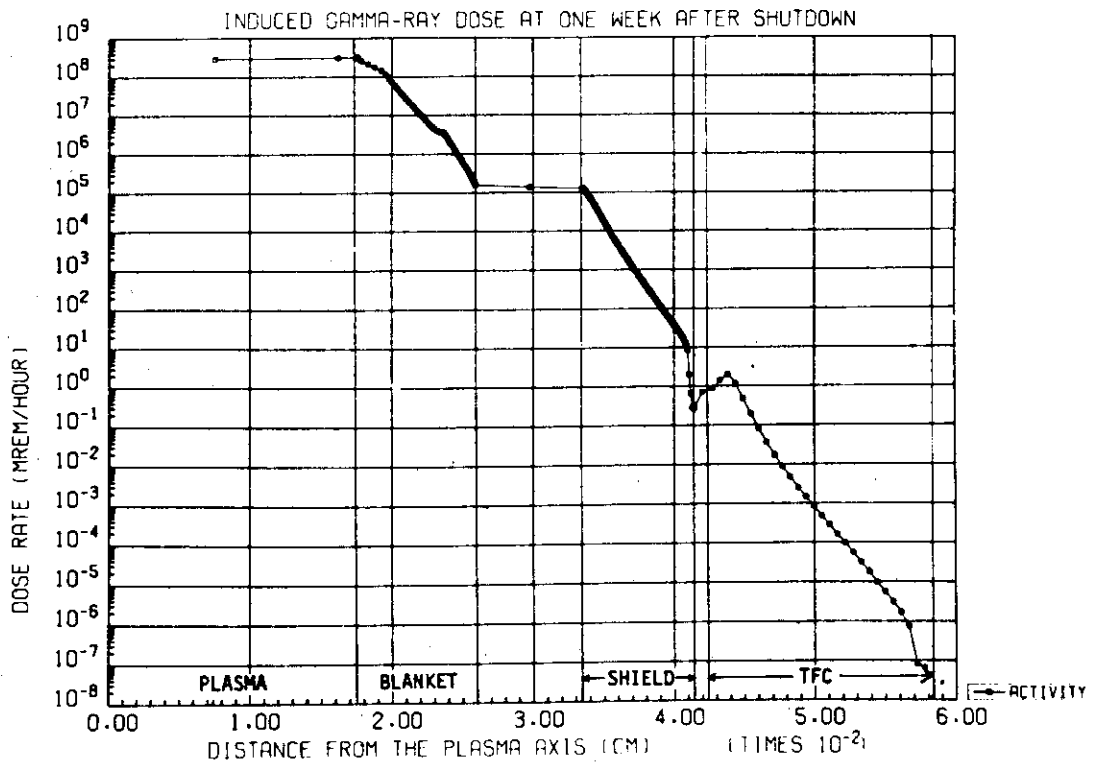


Fig. 1.5 Gamma-ray dose rate from the induced activities of stainless steel at a time one week after one year on operation

Table 1.7 各部の放射線量

1. 炉運転中

	γ 線 (mrem/hr)	中性子 (mrem/hr)
ブランケット内壁	8×10^{10}	8×10^{12}
ブランケット外壁	2×10^8	2×10^{10}
遮蔽壁外表面	10^3	4×10^5
トロイダルコイル外表面	10^{-3}	10^{-1}

2. 炉停止時 (1年間運転-冷却1週間後)

	γ 線 (mrem/hr)
ブランケット内壁	5×10^8
ブランケット外壁	2×10^5
遮蔽壁外表面	0.5
トロイダルコイル内部 (内側表面より15cmの深さの部分)	2
トロイダルコイル外表面	7×10^{-8}

1.2 分解修理システム

1.2.1 故障と修理の概念

分解修理を行なう前提として、どのような故障・事故に対して修理を行なうかについて、予め規定しておかねばならない。

まず次の4つのケースが考えられる。

- ① 地震のように、炉システムに起因しない外部からのactionによるもの。
- ② 炉システムの予期しない、何らかの不具合により発生するもの。
- ③ 炉システムの正常運転による損耗により発生するもので、将来起こり得ると予測できるもの。
- ④ 炉システムの非正常時に発生するもの。例えば、分解修理時の故障。

①のケースについては、例えば飛行機の墜落のような発生する確率の低いものや、戦争のように破壊の意図をもってなされた故障・事故については検討の対象外とせざるを得ない。しかし、地震については、ある程度の震度のものは起こり得ると想定しなければならない。

②のケースも予測できない点では、①と同種の事故である。

したがって、④内的な原因であれ、外的な原因であれ、予測することができない事故、③炉の正常運転時に損耗が予知できるもの、⑥事故対策に伴う炉の非正常時に発生する事故の3種類について考えることにする。

それぞれの場合について、各機器の故障・事故を想定すると Table 1.8 のようになる。

炉に異常がみられた場合には、炉を停止する、しないにかかわらず、すみやかに故障原因、故障箇所をつきとめねばならない。実験炉の性格上「全ての故障に対処できる」ことを原則とする。そのためには「全ての部品が解体、とり出しが可能」でなければならない。

分解修理が必要とされる場合は、ある程度誘動放射能が減衰した後で、故障箇所を含む炉モジュールを他のモジュールと分離し、旋回用台車によって修理室へ運び入れる。

故障箇所は、時間をかけて慎重に修理点検を受ける。あるいはスクラップとして処理処分されたりする。

故障モジュールの代わりには、点検済みのユニットが直ちに修理室より炉室内へ運ばれ再組立てされる。

分解修理が必要なく、炉が運転されたままでも修理可能な場合は、修理装置を炉室内に持ち込み、すべて遠隔操作によって修理が行なわれ、その検査も同様にして高レベルの放射線雰囲気の中で行なわれる。

次に故障頻度として3グループに分けてみる¹⁾。

(1) 故障頻度が高いもの

中性粒子入射加熱装置のイオン源、メカニカルリミッタ壁面などが考えられ、これらは故障しても炉を分解せずに独立して修理できるような設計構造が要求される。

(2) 故障頻度が中程度のもの

ブランケット容器のプラズマに面する壁面が考えられる。これは、そこだけを独立に修理することは、構造上不可能と考えられるので、炉の分解を伴う修理による。

Table 1.8 各機器の故障・事故の分類

対 象	㉔	㉕	㉖	故障の発見
	地震などのような炉システムに対する突発的事故による故障(予測不可能)	炉の定常運転による損耗(予測可能)	非定常時の作業により付加的に生ずる故障	
ブランケット容器	容器の破損	第一壁の損傷		Heのリーク
主冷却配管	継手部からの洩れ	バルブシートの摩耗	配管内への異物混入	Heのリーク
トロイダルコイル	応力付加等によるquench・クライオスタットの損傷・リーク		クライオスタットの損傷	quench 真空不良
ポロイダルコイル	応力付加等によるquench クライオスタットの損傷・リーク		クライオスタットの損傷	quench 真空不良
NBI	放電 真空リーク Heの沸騰 吸着剤の脱落	イオン源フィラメントの消耗 電極の損耗	取付フランジ面の損傷 シールドの損傷	ビーム解析 真空不良
メカニカルリミッタ	真空シールのリーク	リミッタヘッドの損耗 ベローシールの破損	リミッタヘッドの損耗 シールドの損傷	動作不良 プラズマ拡散
真空ポンプ	再生配管継手からの洩れ パネルの損傷		取付フランジ面の損傷 シールドの損傷	真空不良
遮蔽壁	結合ボルトの破損 真空リーク 冷却水のリーク	遮蔽壁内張の損傷	シール面の損傷 冷却不足による崩壊熱損傷	真空不良 冷却水リーク
分解修理装置	アライメント精度不良		軸受の焼損 ハンドリングミスによる部品の損傷	動作不良
作業員			トリチウム、放射線被曝 作業ミスによる人身事故	モニター

(3) 故障頻度の低いもの

- (i) トロイダルコイルはブランケット容器の修理手順と似た方法で分解修理できる。しかし、ポロイダルコイルに関しては、円筒部については修理可能であるが、上下の大径ポロイダルコイルは、スペース的、構造的に修理は難しい。

(ii) 放射線遮蔽壁は故障しそうもない。

故障するとすれば、真空容器とするために組立時に溶接するヘリ継手の部分であるが、これは炉を分解せずに修理できる。

(iii) ブランケット容器外周部ならびに真空系内の配管類も故障頻度は少ないと考えられる。

以上のものについても(1)と同様に炉を据えつけた状態で遠隔操作機械によって修理できるであろう。現状では故障頻度を明確に予測することは不可能であるが、大略の目安として高頻度とは毎年1回以上、中程度とは10年に2~3回、低頻度とは10年に1回以下を想定する。

以下、1.2.2では、主要な部品について分解修理手順を述べる。

1.2.2 分解修理手順

(1) ポロイダルコイルの分解修理

(i) 大径ポロイダルコイル上・下部については、故障しないものと仮定する。(安全率を大きくとり、丈夫なコイルを製作する)しかし、故障の種類によっては、修理可能な場合もある。クライオスタットの洩れのような場合は、修理装置を炉室内に搬入し修理できるであろう。一方、コイル導体の quench による焼損のような場合は、修理不可能であり、全部を取り替えるなければならない。

下側の大径ポロイダルコイルについては、地下のピットに予備コイルを準備しておくことは可能である。しかし、上側については、炉室内へ新しいコイルを持ち込むことは不可能であり、炉室のスペースから考えて予め炉室内に予備コイルを設けておくこともできない。

(Fig. 5.27参照)

したがって、故障しないものと仮定せざるを得ない。

(ii) ポロイダルコイル円筒部に関しては、Table 1.9 の如く2通りの方法が考えられる。但し、第1案では、NBIを吊るために1000トン天井クレーンが必要となるため、第2案の方を提案する。

(2) ブランケットの分解修理

ブランケットに関しては、Table 1.10 のようなフローチャートで行なう。一番の難問は、ブランケット容器を放射線遮蔽壁の横から出し入れするために、冷却配管を切断/溶接あるいは冷却配管フランジ部との脱着を行なうという点にある。それと、炉モジュール分割部の切断と溶接も技術的に難しい点である。

(3) トロイダルコイルの分解修理

炉モジュールにトロイダルコイルを取付けたまま修理室内へ運び込む。

(ここまではブランケットの分解修理手順と全く同じである。)

↓
トロイダルコイルを本体からはずす。

↓
新しいトロイダルコイルを本体に取付け、一方故障したコイルは修理あるいはスクラップ処理される。



逆の順で再組立を行なう。

(4) 中性粒子入射加熱装置 (NBI), メカニカルリミッタの分解修理

炉モジュールのポート部からそれぞれをはずし、台車の上に載せたままで旋回台車を用いて修理室へ運び入れる。詳しい手順は、ブランケットの分解修理手順に準じる。抜き取った後の開口部は盲フランジでふさぐ。

(5) 放射線遮蔽壁 (真空容器) の分解修理

遮蔽壁については、ほとんど故障しそうもないと考えられる。しかし、万一故障を起こし、そっくり取り替えると仮定した場合は、ブランケット、配管類、トロイダルコイル、真空ポンプ類などをすべてはずし、それらを新しい遮蔽壁に取りつける作業が必要となる。その作業は多くの時間を要するであろうが、特別難しい問題ではない。スペアの炉モジュールを用意しておけば、時間的な問題は解決される。

参考文献

- 1) 炉設計研究室: JAERI-M 7300 (1977) 9月 「核融合実験炉第一次予備設計」
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所再処理工場保安規定 50 規定第 6 号
昭和 50 年 8 月 7 日

Table 1.9 ポロイダルコイル円筒部の分解修理手順

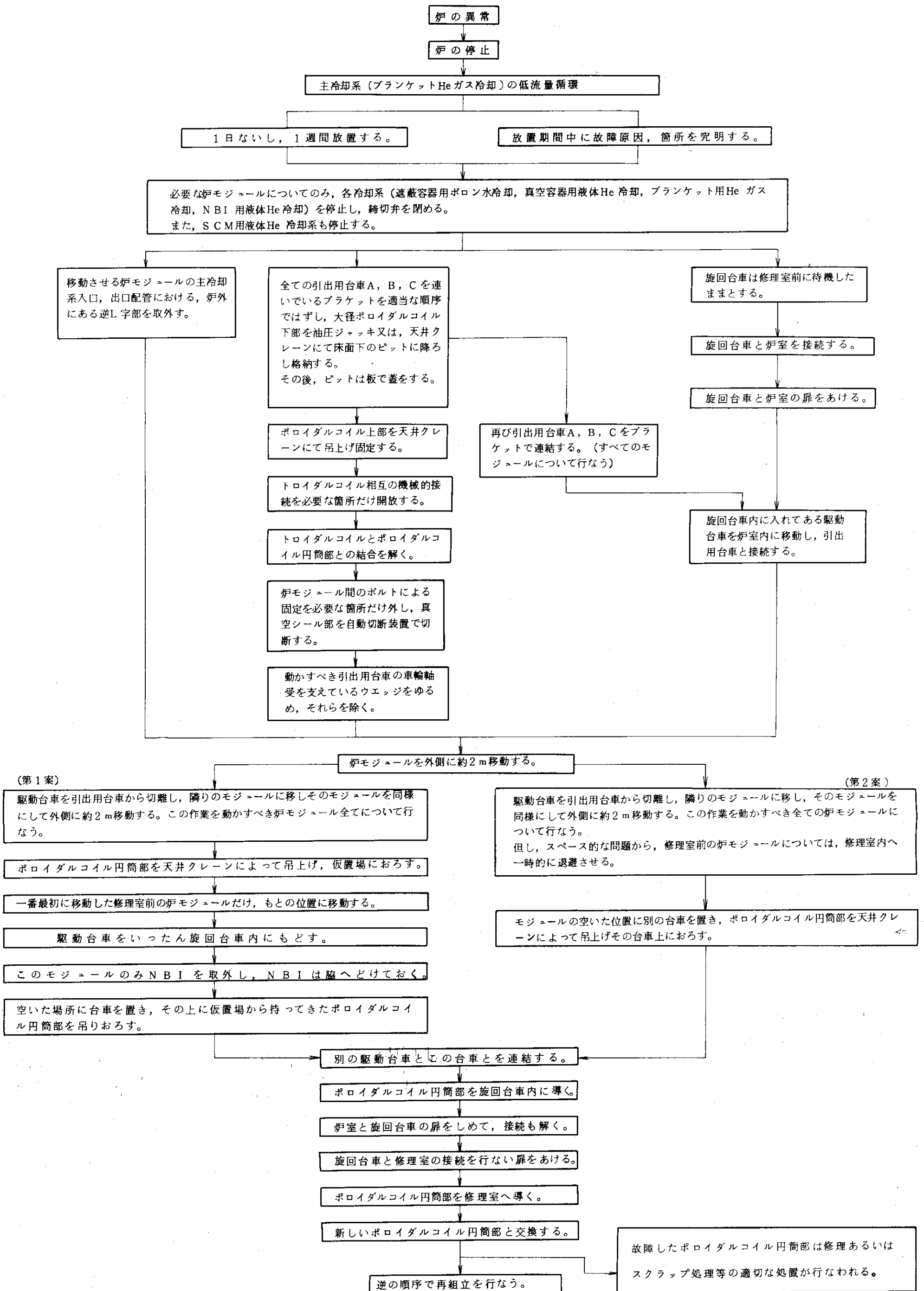
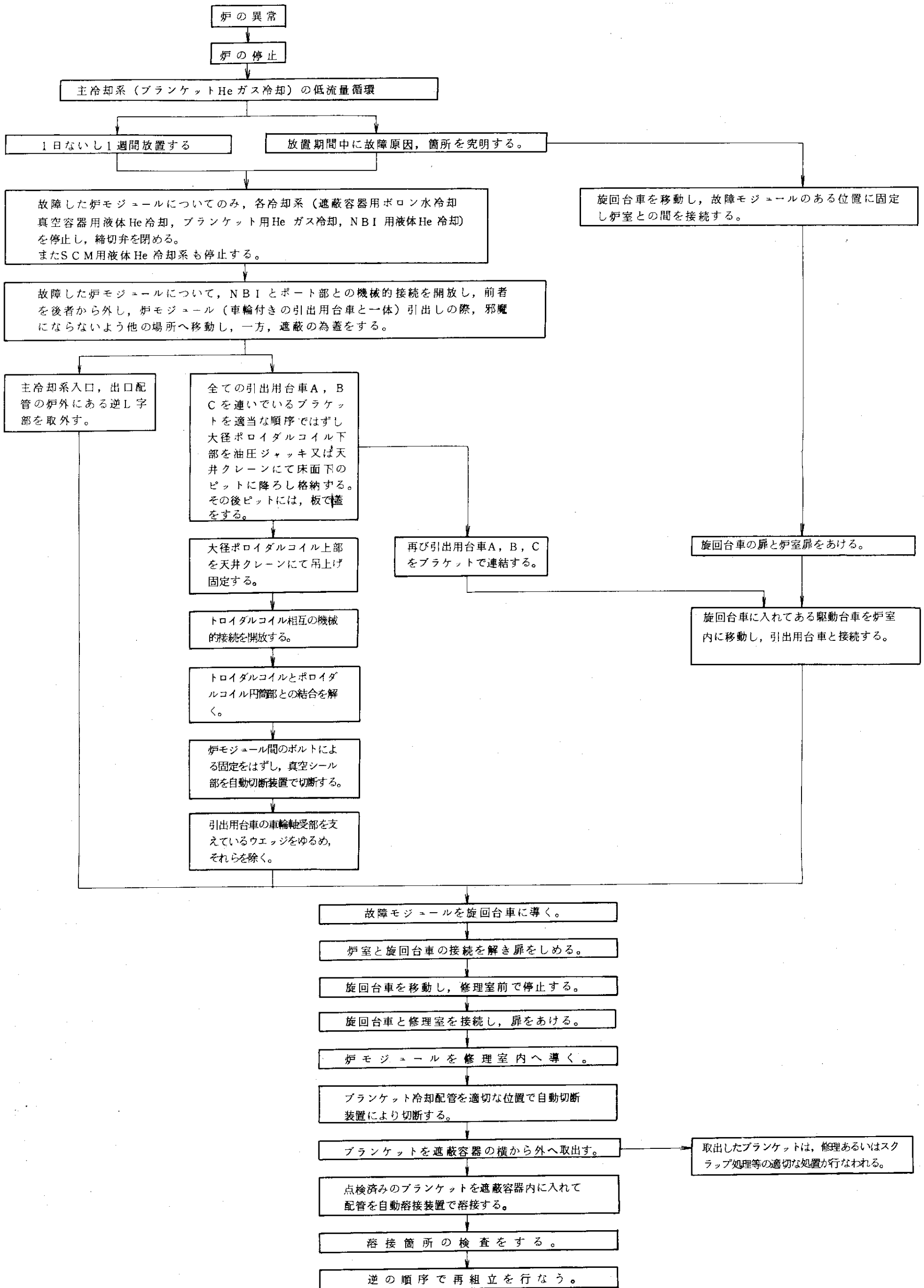


Table 1.10 ブランケットの分解修理手順



2. 炉の分解及び組立作業

2.1 炉モジュール解体前の準備作業

(1) 概要

炉モジュール移動に先立ち次のような作業が必要である。

- ① 機械的結合の解除
遮蔽室，台車固定機構等
- ② 配線，配管の解除
トロイダルコイル，ポロイダルコイル等の渡り線，冷却配管等
- ③ 重量物の移動
ポロイダルコイル，トロイダルコイル等
- ④ 真空シール解除
遮蔽壁，排気系等

ここで，④に関してはその構造寸法等が現段階では不明であるので，検討を省略した。しかし，実際には，トロイダルコイル，ポロイダルコイルの熱絶縁を含めた渡り線，巻き戻し線の解除が比較的困難と考えられるので今後詳細検討が必要になるであろう。

(2) 機械的結合の解除

(i) 炉ユニット締結ボルトの解除

真空シールの結合は，Fig. 2.14に示す。

真空によりライナー面に働く力Nは，断面(A～)の面積に大気圧をかけることにより求められる。(Fig. 2.1)

$$N = 1 \times 10^4 \times \left\{ \pi \times 5.8^2 \times \frac{150}{360} + 2 \times (2.6 + 1.1) \right.$$

$$\left. \times 5.5 \times \frac{1}{2} \right\} = 644 \times 10^3 \text{ kg}$$

ライナーには：幅25cm，全長13mの鉛を使用する。

ライナーの面圧は，

$$\sigma = \frac{644 \times 10^3}{25 \times 1300} = 19.8 \text{ kg/cm}^2$$

となる。

(ii) 台車固定機構

炉モジュールは，引出用台車の上に乗っており床面との接地は台車車輪となるが，長時間その状態であると種々の要

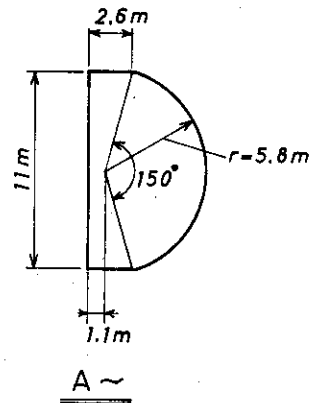
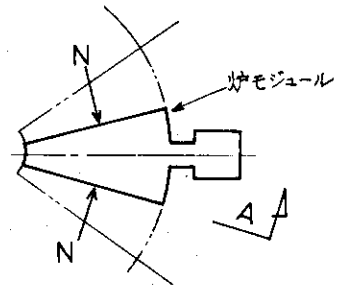


Fig. 2.1 ライナー面に働く真空力

因から不具合が生じてくると考えられるので、炉モジュールの移動の時のみ全荷重を車輪で受けることとする。ここでは、炉モジュール固定時に車輪にかかる負荷を軽減する支持台の機構について検討する。

支持台がジャッキを兼ね、車輪の軸受部を支持する構造とする。ジャッキとしては、油圧式、機械式のものがあるが、約4000tonの重量を昇降するには、例えば1000tonのジャッキとしても4台が必要であり、これらを同期させて昇降させるのは必ずしも容易でない。台車の構造面から考慮してみると、これについては3.1「引出用台車」の項で述べるが、台車は4台に分かれておりそれぞれ単独に数個のジャッキが必要となりスペースの面からジャッキの入る余地のない台車もあり、この方法はまず不可能である。

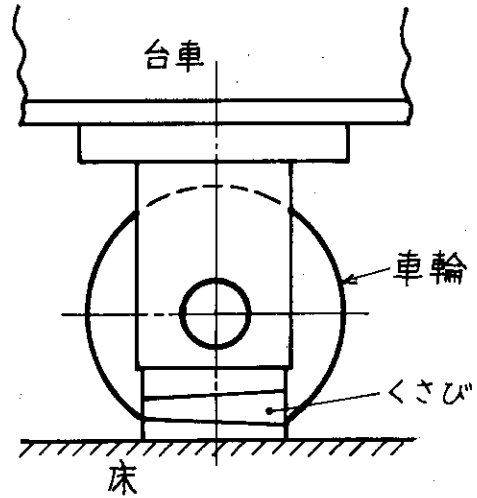


Fig. 22 ぐさび概略図

ここでは、車輪に負荷がかからないようFig. 22のように車輪軸受部と床面との間にくさびを打ち込む方法について検討する。このぐさびは、各車輪軸受部すべてに備え付けるものとする。

車輪荷重については、3.1「引出用台車」の項で述べるが、4台の台車の車輪1個当りにそれぞれ108ton, 60ton, 97ton, 103tonの荷重がかかる。従ってここでは、最大荷重108tonの場合について検討する。

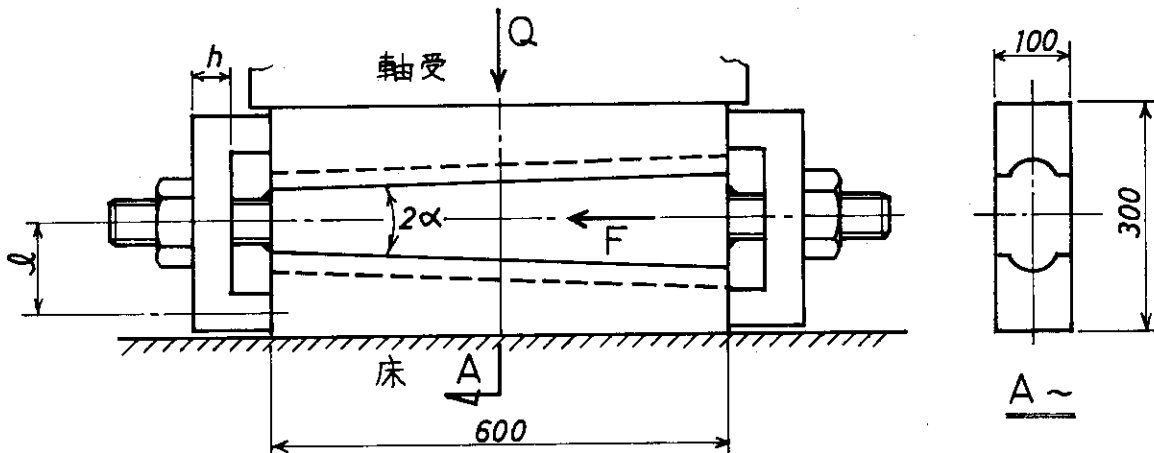


Fig. 23 ぐさび

Fig. 23 に示すようなくさびについて検討する。

ぐさびを移動させるのに要する力Fは、次式で与えられる。

$$F = 2 \cdot \frac{Q}{\cos \alpha} (\cos \alpha \tan \lambda + \sin \alpha)$$

α ; ぐさびの傾斜角 25°

λ ; 摩擦角

摩擦係数 $\mu = 0.05$ とすると (MoS₂ コーティング)

$$\alpha = 2.5^\circ < \lambda = \tan^{-1} \mu = 2.8624^\circ$$

となりくさびは自然にゆるまない。

従って

$$F = 2 \times \frac{108/2}{\cos 2.5^\circ} \times (\cos 2.5^\circ \times 0.05 + \sin 2.5^\circ)$$

$$= 10.12 \text{ ton}$$

となる。

この推力 30° 台形ネジで得るとすると、所要トルク T は、

$$T = F \cdot r \cdot \frac{L + 2\pi r \mu}{2\pi r - L \mu}$$

r ; ねじ山の平均半径 22 mm (M48)

L ; ねじのリード 8 mm

μ ; 摩擦係数 0.05

従って

$$T = 10.12 \times 10^8 \times 22 \times \frac{0.8 + 2\pi \times 2.2 \times 0.05}{2\pi \times 2.2 - 0.8 \times 0.05}$$

$$= 2405 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

となる。又、ねじは、

$$\tan \alpha = \frac{L}{2\pi r} \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{5}{2\pi \times 24} = 1.90^\circ$$

とすると

$$\alpha = 1.90^\circ < \lambda = \tan^{-1} \mu = 2.8624^\circ$$

となり、自然にゆるまない。

一般に、人力で締め得るトルクは、30kg×100cm程度であり、充分人力で締め得る程度のトルクである。従って、台車の支持は人力で支持台を順次昇降させることが可能である。

地震が発生した場合について Fig.2.4 のようなモデルを検討する。図に示す振動方向について検討すると、くさびと床面との摩擦により発生する W_2 という外力が a 面のくさびの摩擦力 W_1 に打ち勝ち下端のくさびがとび出そうとする力 W が発生することになる。従って、その力に耐えうるようなブラケット強度及びボルト強度を備えてなけ



Fig. 2.4 地震による負荷

ればならない。反対方向の振動方向についてはb面において同様のことがいえる。条件としてはa面の場合と同様でありここでは、図に示すモデルについて検討すればこれを満足する。

a面で支持し得る力 W_1 は、次のようになる。

$$\begin{aligned} W_1 &= \mu_1 Q \cdot \cos \alpha \\ &= 0.05 \times \frac{108}{2} \times \cos 2.5^\circ \\ &= 2.8 \text{ ton} \end{aligned}$$

くさびと床面との間で発生する力 W_2 は、この面がすべり始める直前の力が最大であるから次のようになる。

$$\begin{aligned} W_2 &= \mu_2 \cdot Q \quad \mu_2 ; \text{静摩擦係数 } 0.2 \\ &= 0.2 \times \frac{108}{2} \\ &= 10.8 \text{ ton} \end{aligned}$$

従って、 W は

$$\begin{aligned} W &= W_2 - W_1 \\ &= 10.8 - 2.8 = 8 \text{ ton} \end{aligned}$$

となる。

ボルトの引っ張り応力 σ_1 については、次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{W}{A} \quad A ; \text{ボルトの有効断面積} \\ &= \frac{4 \times 8 \times 10^3}{\pi \times 3.95^2} \\ &= 653 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

SUS材を使用すれば、許容引張応力として $\sigma = 1050 \text{ kg/cm}^2$ ¹⁾を考えればよくこれを満足する。

ボルトのフランク面面圧は、

$$q = \frac{W}{\pi \cdot Z \cdot h (d - h)}$$

で与えられる。ここで $q = 1 \text{ kg/mm}^2$ とすると

$$Z = \frac{W}{\pi \cdot h (d - h) q} \quad \begin{array}{l} d ; \text{おねじの外径 } \phi 48 \text{ mm} \\ h ; \text{ねじ山高さ } 4.25 \text{ mm} \end{array}$$

となり、必要なネジ山数が与えられる。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{8 \times 10^3}{\pi \times 0.425 (48 - 0.425) \times 100} \\ &= 13.7 \end{aligned}$$

従って、ネジ山数は14あれば良い。しかし、くさび締付けのための力は10ton必要であり地震に対する必要数より多くなる。

$$Z' = \frac{10 \times 10^3}{\pi \times 0.425 (4.8 - 0.425) \times 100}$$

$$= 17.1$$

したがって、ネジ山数は 18 必要となる。

ブラケットのボルト穴部には曲げモーメントが作用する。

$$M = \ell \cdot W \quad \ell = 120 \text{ mm}$$

$$= 12 \times 8 \times 10^3$$

$$= 96 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

SUS材の許容曲げ応力を $\sigma = 1500 \text{ kg/cm}^2$ とする²⁾。

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

$$\frac{M}{\sigma} = \frac{bh^2}{3}$$

$$h = \sqrt{\frac{3 \times M}{\sigma \cdot b}}$$

$$= \sqrt{\frac{3 \times 96 \times 10^3}{1.5 \times 10^3 \times 2.5}}$$

$$= 8.8 \text{ cm}$$

従って、h は 9 cm あればよい。

地震による力が Fig. 25 のモデルのように作用した場合につき検討する。斜線部に作用するせん断力が一番厳しいと考えられる。

$$\tau = \frac{W}{A} = \frac{\mu \cdot Q}{B \times L}$$

$$= \frac{0.2 \times \frac{108}{2} \times 10^3}{10 \times 60}$$

$$= 18 \text{ kg/cm}^2$$

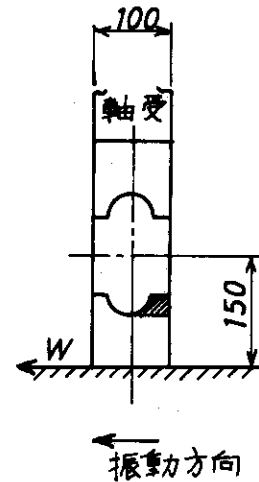


Fig. 25 地震による負荷

SUS材を使用するので強度的には充分である。

したがって、このウェッジを使用すれば人力程度で充分作業でき、地震にも耐えることができる。

(3) 大径ポロイダルコイルの昇降

(i) 概要

炉モジュールを移動する際は、炉体と干渉する位置におけるポロイダルコイルは上下に退避させる必要がある。

上側のポロイダルコイルは、天井クレーンにて上方に吊り上げ保持する。しかし、炉心部の円筒ポロイダルコイルを取り出す作業は天井クレーンで行うため、円筒ポロイダルコイルを吊り上げるためには、一旦ポロイダルコイルを吊り、上方で保持した後、炉モジュールを半径方

向へ移動し、再度ポロイダルコイルを邪魔にならないような場所へ置かなければならない。そのスペースあるいは設置方法も考慮しなくてはならない。概念図 Fig. 2.13を参考のこと。

下部大径ポロイダルコイルは、床面下に設けたピットに天井クレーンと油圧ジャッキで降ろす。

(ii) ポロイダルコイルに働く応力

ここでは、上部ポロイダルコイルに働く応力を検討する。下部ポロイダルコイルについては、ピット内の油圧ジャッキの数を増すことによりその支持点数を増すことができ上部ポロイダルコイルに比較し特に問題はないのでここでは検討しない。

上部ポロイダルコイルの支持点数を4点とし、コイル自重による応力を算出する。(Fig. 2.6)

① 曲げモーメント

1点における曲げモーメントは、支持反力による曲げモーメントと分布荷重による曲げモーメントの合成による。

支持反力による曲げモーメントは

$$\begin{aligned}
 M_1' &= - \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i'}{2\pi} \cdot R \cdot W_i' \sin \theta_i' \\
 &= - \frac{R \cdot W_i'}{2\pi} \sum_{i=1}^n \theta_i' \sin \theta_i' \\
 &= - \frac{R \cdot W_i'}{2\pi} \left(0 \sin 0^\circ + \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} + \pi \sin \pi + \frac{3\pi}{2} \sin \frac{3\pi}{2} \right) \\
 &= + \frac{R \cdot W_i'}{2}
 \end{aligned}$$

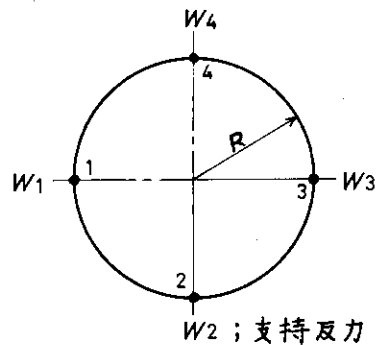


Fig. 2.6 計算モデル

となる。

分布荷重による曲げモーメントは

$$M_1' = \int_0^{2\pi} \frac{\theta}{2\pi} \cdot w \cdot R \cdot R \cdot \sin \theta \, d\theta = -wR^2$$

となる。

したがって、1点にかかる曲げモーメント M_1 は

$$\begin{aligned}
 M_1 &= M_1' + M_1'' \\
 &= \frac{R \cdot W_i'}{2} - w \cdot R^2 \qquad W_i' = \frac{1}{4} \times 2\pi R w \\
 &= \frac{\pi \cdot R^2 \cdot w}{4} - w \cdot R^2 \\
 &= -0.21 \times w \cdot R^2
 \end{aligned}$$

となる。

㊤ 振りモーメント

支点反力による振りモーメントは

$$\begin{aligned}
 T'_A &= \sum_{i=1}^4 \frac{\theta_i}{2\pi} \cdot W_i \cdot R \cdot (1 - \cos \theta_i) \\
 &= \frac{R \cdot W_i}{2\pi} \left\{ 0(1 - \cos 0^\circ) + \frac{\pi}{2}(1 - \cos \frac{\pi}{2}) + \pi(1 - \cos \pi) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{3\pi}{2}(1 - \cos \frac{3\pi}{2}) \right\} = R \cdot W_i = \frac{\pi}{2} R^2 \cdot w
 \end{aligned}$$

分布荷重による振りモーメントは、

$$T''_A = \int_0^{2\pi} \frac{\theta}{2\pi} \cdot w \cdot R \cdot R(1 - \cos \theta) d\theta = -3.151 WR^2$$

したがって最大振りモーメントは、

$$T_A = -1.58 WR^2$$

となる。

ポロイダルコイルの設計は、本書の対象外であるが、これらの曲げモーメント、戻りモーメントに耐えるよう設計されなければならない。

(iii) 走行用レール保護板

下部大径ポロイダルコイルの昇降用ピットがあり、台車走行は、ポロイダルコイルを降ろし、ピットにレールを取り付けなければならない。このピット部のレール保護板について検討する。

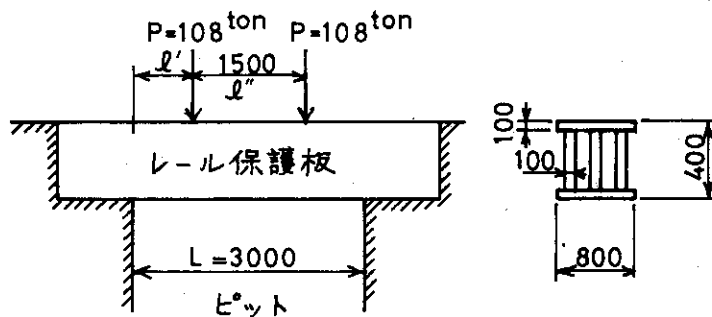


Fig. 27 レール保護板

内側ポロイダルコイル用ピットに装備する走行用レール保護板のモデルを Fig. 27 に示す。

最大曲げモーメントMは、

$$M = P \times l' = 108 \times 10^3 \times 75 = 8.1 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

となる。保護板の断面2次モーメントIと断面係数Zは、

$$I = 3.93 \times 10^5 \text{ cm}^4 \quad Z = 2 \times 10^4 \text{ cm}^3$$

となる。したがって最大曲げ応力σは

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{8.1 \times 10^6}{2 \times 10^4} = 405 \text{ kg/cm}^2$$

となる。最大たわみ量 δ_{\max} は

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{P \cdot \ell' \cdot (\ell'')^2}{8EI} \\ &= \frac{108 \times 10^3 \times 75 \times 150^2}{8 \times 2.1 \times 10^6 \times 3.93 \times 10^5} = 2.8 \times 10^{-2} \text{ cm} \end{aligned}$$

となる。微少たわみである。

この走行レール保護板の重量は、

$$W = 10 \times (2 \times 80 + 3 \times 20) \times 400 \times 8 \times 10^{-3} = 7.04 \times 10^3 \text{ kg}$$

となり、この重量の保護板を運搬し設置するための作業車が必要である。

外側の保護板については Fig. 2.8 のようなモデルについて

検討する。構造は前述のものと同様である。

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{4} P \cdot L \\ &= \frac{1}{4} \times 108 \times 10^3 \times 150 = 4.05 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{Z} \\ &= \frac{4.05 \times 10^6}{2 \times 10^4} = 200 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{P \cdot L^3}{48E} \\ &= \frac{108 \times 10^3 \times 150^3}{48 \times 2.1 \times 10^6 \times 3.93 \times 10^5} = 0.92 \times 10^{-2} \text{ cm} \end{aligned}$$

$$W = 10 \times (2 \times 80 + 3 \times 20) \times 250 \times 8 \times 10^{-3} = 4.4 \times 10^3 \text{ kg}$$

以上のように問題ない。

(4) 真空シール解除

(i) 真空シールの構造

真空シール解除のため、炉ユニット端面部を遮蔽する遮蔽ブロックを取除いた後、炉室は強い放射線下にさらされる。従って遮蔽ブロック取除き以降の作業はすべて遠隔操作する必要がある。

真空シールは、遮蔽壁外周で行うものとし、相隣る遮蔽壁の端面を薄板シール溶接するものとする。以下薄板の取付形状につき検討する。

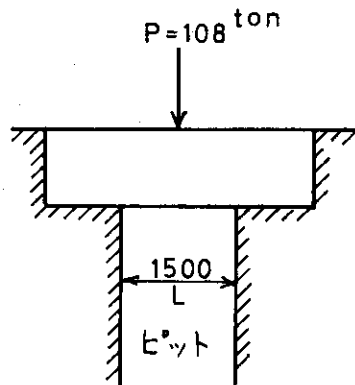


Fig. 2.8 レール保護板

① 最も単純な方法として Fig. 2.9 の形状のものを検討する。

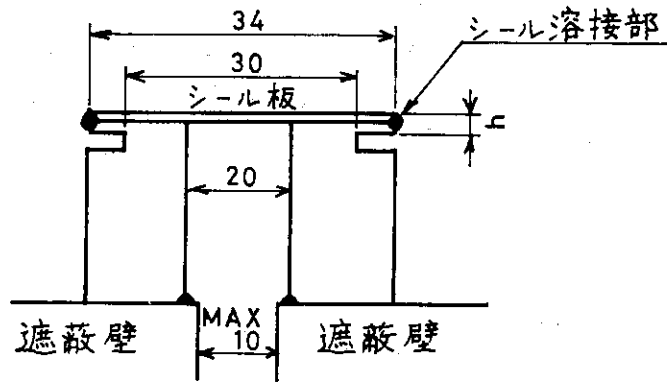


Fig. 2.9 シール部

遮蔽部は、シール板に対して充分剛性があるので変形しないものとする。又、遮蔽部は、約 $\phi 5800$ と充分曲率半径が小さいので、シール板は、両面を固定した無限延の帯状を考える。

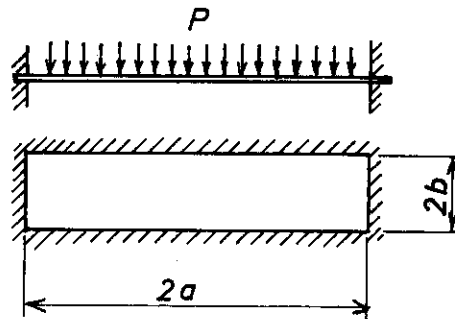


Fig. 2.10 シール板モデル

ここで、
$$\sigma_{\max} = \beta_{20} \frac{Pb^2}{h^2}$$

P ; 外圧 0.01 (kg/mm²)

b ; 板幅 34 mm

h ; 板厚

β_{20} ; 最大応力係数 $a/b = \infty$ のとき 2.00

シール材として SUS 304 L を考え、許容応力を 15 kg/mm² とすると

$$\begin{aligned} h &\geq \sqrt{\frac{\beta_{20} \cdot P \cdot b^2}{\sigma_{\max}}} \\ &= \sqrt{\frac{2.00 \times 0.01 \times 34^2}{15}} \\ &= 1.24 \end{aligned}$$

したがって板厚は、1.3 mm とする。

しかし、再取付後の炉ユニットの位置が前回と同じであるという保証はなく、端面がそろわなくなる可能性がある。又、再溶接時のシール板の位置決め方法の困難性、シール溶接部が2ヶ所になるなど溶接の信頼性は必ずしも高くない。

㊤ 前項で述べた信頼性をカバーするため、シール部で調整可能な方法を考える。なお、本書では、この方法を採用する。

Fig. 2.15 のようなシール板につき検討する。この構造では、再溶接部は1ヶ所であり、シール板は可燃性があるので、溶接時両側からローラでシール板を密着させることも容易である。かつ、密着後、端面を揃えるため機械加工することも可能である。

初期に6 mm 間隔を開けておき圧着ローラ (Fig. 2.11) でシール板を密着させ溶接するものとしローラとシール板の強度について検討する。

負荷の影響部分を密着部分の2倍と考へて、密着に要する荷重を計算する。

最も厳しい条件として Fig. 2.12 に示すモデルにつき検討する。

ここで、

$$\sigma_{\max} = \frac{F l_2^3}{3EI} \left(1 + \frac{l_1}{2l_2}\right)$$

$$F = \frac{\delta_{\max} \times 3EI}{l_2^3 \left(1 + \frac{3l_1}{2l_2}\right)}$$

となる。又、 $\delta_{\max} = 3 \text{ mm}$ 、 $l_1 = 10 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 50 \text{ mm}$ 、板厚 $h = 0.5 \text{ mm}$ 、幅 $b = 50 \text{ mm}$ であるので P は次のようになる。

$$F = \frac{3 \times 3 \times 2.1 \times 10^4 \times \frac{1}{12} \times 50 \times 0.5^3}{50^3 \left(1 + 3 \times 10 / 2 \times 50\right)}$$

$$= 0.6 \text{ kg}$$

したがって、圧着ローラとしては0.6 kg 程度のものを考えれば良い。

ローラ直径 $D = 10 \text{ mm}$ 、幅 $B = 5 \text{ mm}$ とすると、ヘルツの面圧は、

$$P = 0.591 \sqrt{\frac{F \cdot E}{D \cdot B}}$$

$$= 0.591 \times \sqrt{\frac{0.6 \times 2.1 \times 10^4}{10 \times 5}}$$

$$= 9.38 \text{ kg/mm}^2$$

となり、ローラ材料にSUS材を使用すれば強度的に充分である。

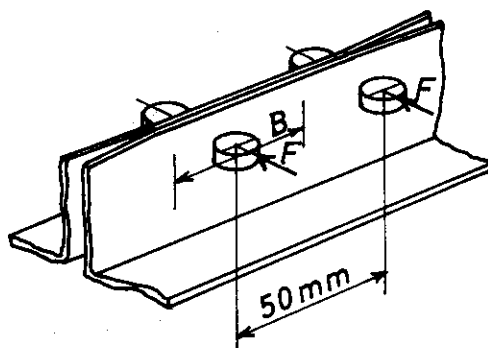


Fig. 2.11 圧着ローラ-負荷モデル

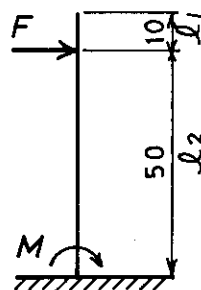


Fig. 2.12 圧着ローラによるシール板負荷モデル

シール板の強度としては、曲げモーメントを考える。したがって2次のようになる。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{F \times \ell_2}{\frac{1}{6} b h^2} = \frac{0.6 \times 50}{\frac{1}{6} \times 50 \times 0.5^2} = 14.4 \text{ kg/mm}^2$$

SUS材の許容曲げ応力としては、 15 kg/mm^2 を考えればよくこれを満足する。

(ii) 真空シールの解除装置

真空シールは、シール板が外力により損傷するのを防ぐため遮蔽壁端面より若干後退させた。又、ローラについてはすでに述べた。ここでは、解除手順とその他の装置につき検討する。

① 真空シールの解除手順

真空シールの解除は、自動切断機を真空遮蔽壁外周に設けたガイドレール上に取付け、自動的に真空シール部を1周させて切断する。

再組立時の真空シールは、次の手順により行なう。

- Ⓐ 自動切断溶接機をガイドレール上に取付ける。
- Ⓑ 薄板を圧着ローラで密着させ、端面を揃えるための切断と、溶接を同時に行う。
- Ⓒ 自動切断溶接機を遮蔽壁から取りはずす。
- Ⓓ 切断機によりトリムした切粉を除く。
- Ⓔ テレビカメラを搭載した走行台車をガイドレール上に取付け一周させることにより、溶接部を目視検査する。

洩れ検出器により洩れ検査をする。

Ⓕ 切断

溶接部の切断は、フライス加工、ニブリング加工及びシャー加工が考えられる。いずれも小型のポータブル工具が開発されており使用可能である。

ここでは、切断後の切粉の処置の容易さを考え、シャー加工を採用する。

Ⓖ 溶接

詳しくは、3.5「自動溶接機」の項参照のこと。

Ⓖ 検査

溶接部の検査としてX線検査は放射線のため使用できない。最終的には、Heガスによる加圧法を用いたリーク試験を行うようになる。監視は、TVカメラによる。

2.2 炉モジュールの再組立

炉モジュールを炉体に組込む手順としては、1.2.2「分解修理手順」で述べた手順とほぼ逆の手順に従い作業すれば良い。ただし最終的には検査項目が入るがここではそれについて触れない。再組立時には、以下のような点が問題になる。

炉モジュール遮蔽壁は、外壁をステンレス鋼でおった機械加工品としても超大型構造物であるので、相当の製作誤差を見込んでおく必要がある。したがって、8個の炉モジュールを無理なく放射状に配置するには、炉モジュール相互間にいくらかの間隙をもたせる方が製作誤差の吸収、及び据付誤差の吸収の点から現実的である。

この間隙を4 mm位持たせるものとする。この際の真空シール方法及び外力に耐えるための構造についてはすでに2.1項において述べた炉モジュール外側における放射線遮蔽は、鉛ブロックを真空シール部外側に取り付けるものとする。

炉モジュール移動時にトロイダルコイルの損傷を防ぐため、トロイダルコイルを半径方向に20 mm程度移動させておくものとする。炉モジュールを定位置まで搬入した後、天井クレーン又はその他の装置によりトロイダルコイルを所定の位置へ移動するものとする。

参考文献

- 1) 圧力容器の構造 JIS B 8243 1977
- 2) 炉設計研究室： JAERI-M 7300 (1977) 9月
「核融合実験炉第1次予備設計」
- 3) 機械設計便覧 機械設計便覧編集委員会編 1958

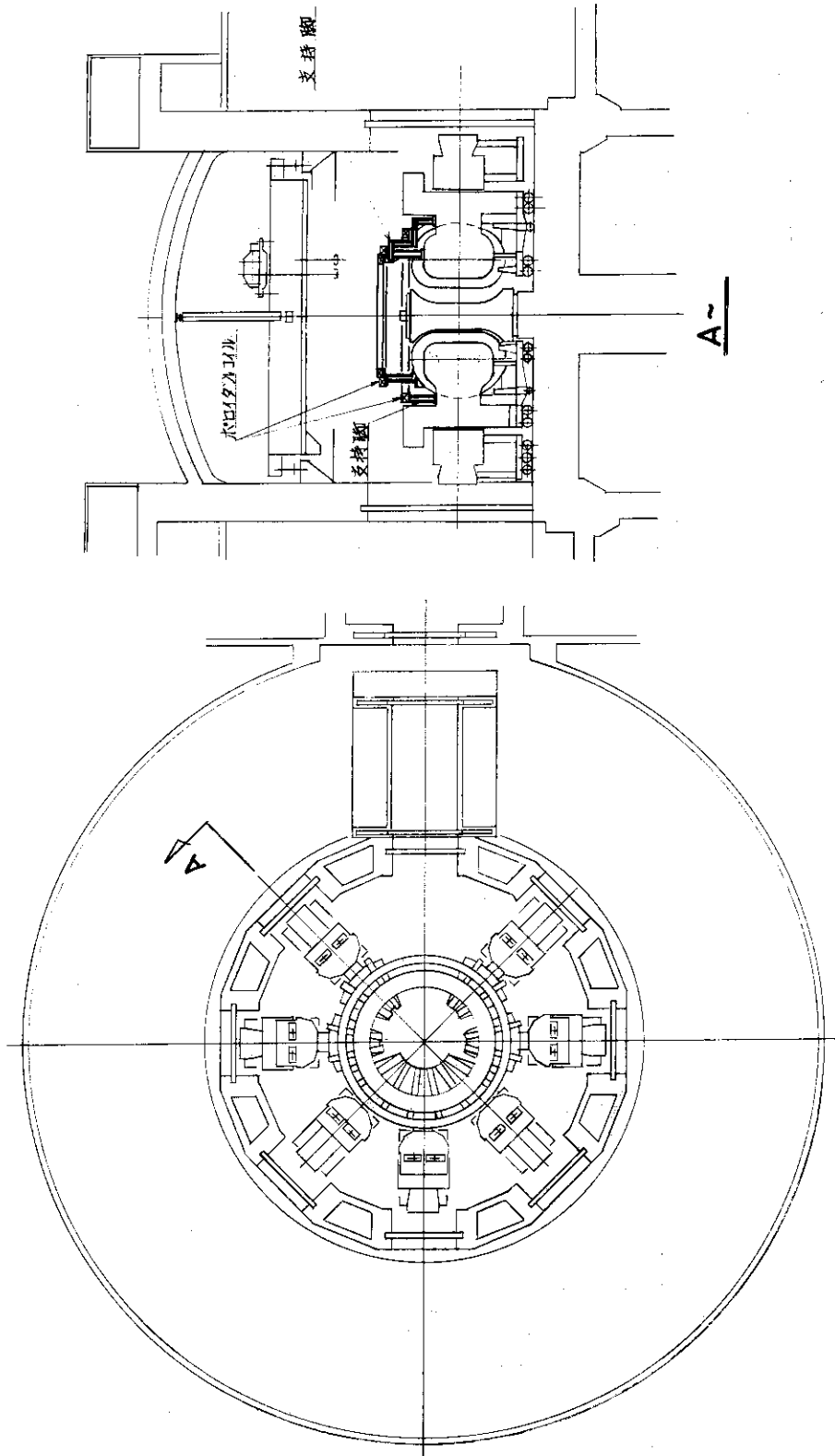


Fig. 2.13 ポロイダルコイル仮設置概念図

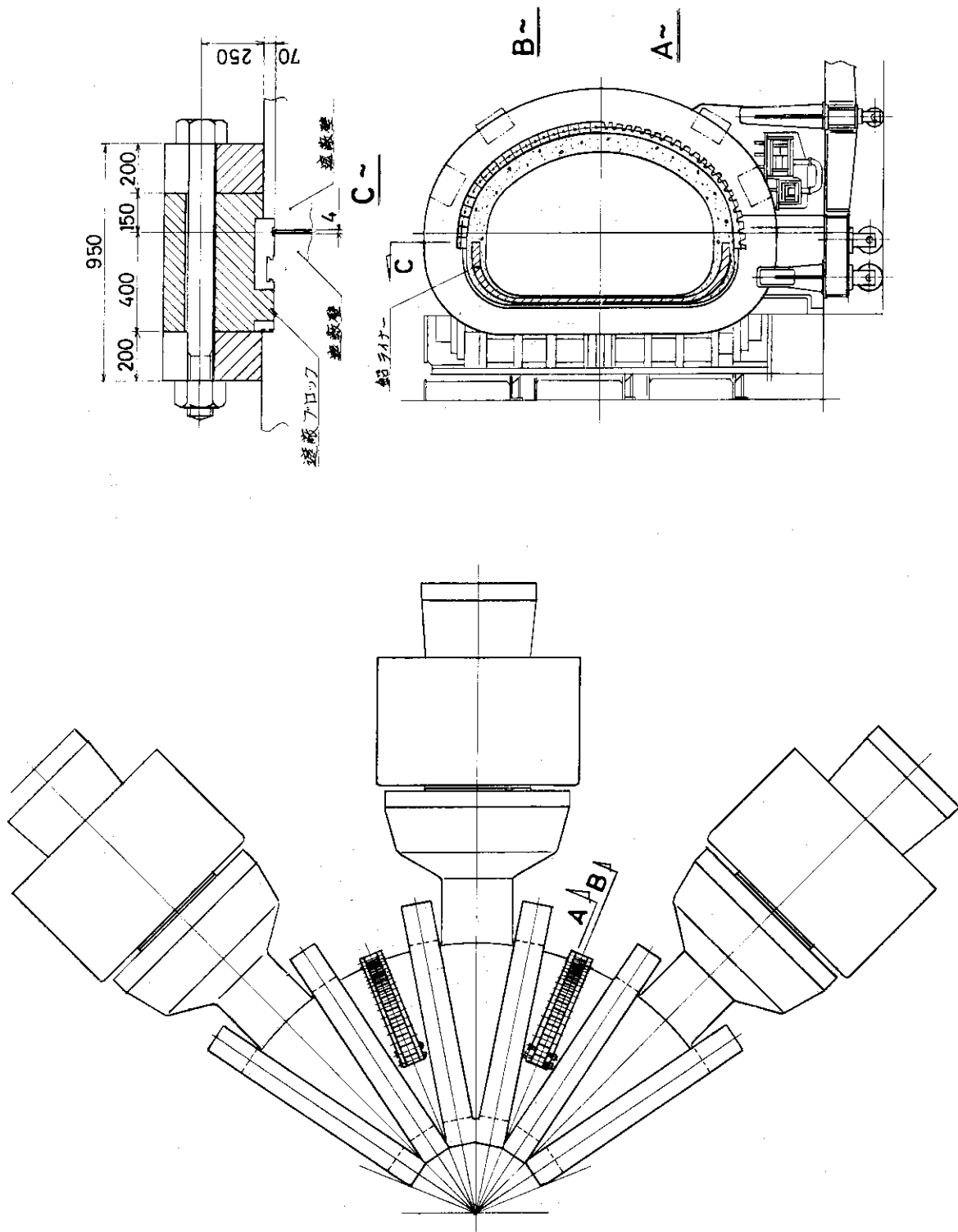


Fig. 2.14 炉モジュール結合部

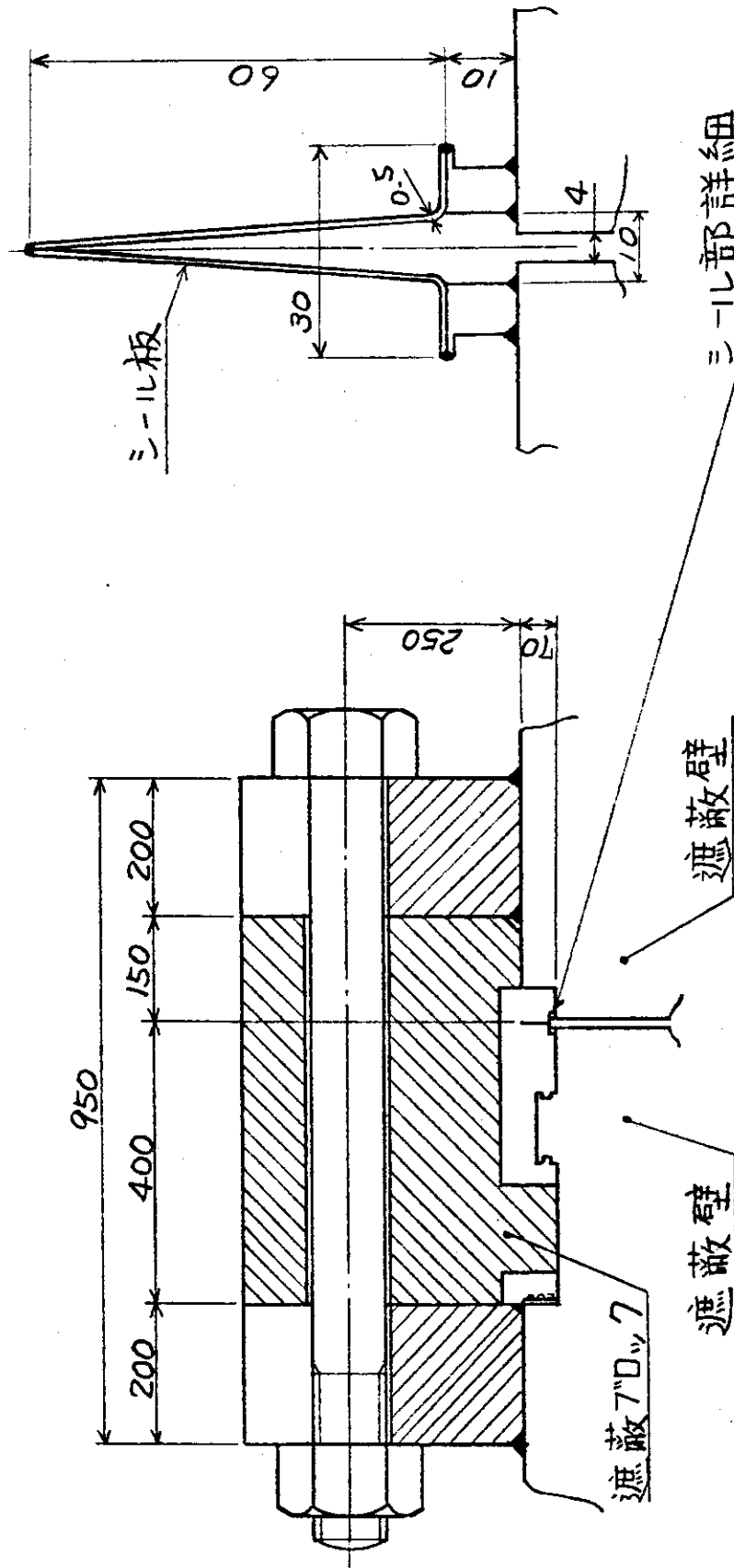


Fig. 2.15 真空シール部詳細

3. 分解修理装置の設計

3.1 引出用台車の設計

(1) 概要

1.1項で述べた設計条件に基づき、引出用台車の設計を行なった。

炉モジュールは、炉心部およびポート部がそれぞれ独立した台車A, B, C, D上に設置されている。(Fig. 3.6を参照)炉モジュールを移動させる時は、その前に台車D上にある中性粒子入射装置をいったん修理室へ移動する。その後、台車A, B, Cを駆動装置によって引き出すものとする(Fig. 3.7参照)。したがって駆動装置の所要馬力は、連結された台車A, B, Cの駆動に対して決定する。引出用台車は、車輪方式とし、走行抵抗は起動時175.2トン、走行時100.4トンである。駆動装置は、11kWの電動機を動力源とし、床面に取り付けたラック上を駆動装置のピニオンギヤが転動し移動する。

(2) 車輪

構造板材の主メンバーは、100mmのSUS(SUS304L)材とする。台車構造物の重量を概算し、車輪関係の仕様を決定する。

① 台車A

台車Aの車輪が受ける総荷重は1079tである。台車の移動は、車輪方式によるものとする。車輪の仕様は、

$$\text{車輪径} \quad D = 1200 \text{ mm}$$

$$\text{車輪巾} \quad B = 270 \text{ mm}$$

$$\text{車輪个数} \quad N = 10$$

車輪1個の受ける荷重は

$$W = \frac{1079 \text{ t}}{10} \approx 108 \text{ t/個}$$

ヘルツ面圧： P

$$P = 0.59 \sqrt{\frac{W \cdot E}{D \cdot B}}$$

$$= 49.4 \text{ kg/mm}^2$$

計算値に対する判定は後述する。

② 台車B

台車Bの車輪が受ける総荷重は469tである。

車輪の仕様は

$$\text{車輪径} \quad D = 800 \text{ mm}$$

$$\text{車輪巾} \quad B = 270 \text{ mm}$$

$$\text{車輪个数} \quad N = 8$$

車輪1個の受ける荷重は

$$W = \frac{469 \text{ t}}{8} \approx 60 \text{ t/個}$$

ヘルツ面圧： P

$$P = 0.59 \sqrt{\frac{W \cdot E}{D \cdot B}}$$

$$= 45.1 \text{ kg/mm}^2$$

⊙ 台車C

台車Cの車輪が受ける総荷重は1548 tである。車輪寸法は台車Aと同じで16個の車輪を用いる。

車輪1個の受ける荷重は

$$W = \frac{1548}{16} \approx 97 \text{ t/個}$$

ヘルツ面圧： P

$$P = 0.59 \sqrt{\frac{W \cdot E}{D \cdot B}}$$

$$= 46.8 \text{ kg/mm}^2$$

⊙ 台車D

台車Dの車輪が受ける総荷重は1032 tである。車輪寸法は台車Aと同じで10個の車輪を用いる。

車輪1個の受ける荷重は

$$W = \frac{1032}{10} \approx 103 \text{ t/個}$$

ヘルツ面圧： P

$$P = 0.59 \sqrt{\frac{W \cdot E}{D \cdot B}}$$

$$= 48.2 \text{ kg/mm}^2$$

次に、ステンレス鋼の許容ヘルツ応力を推定する。

一般に、車輪に許容される Herz 応力は、pitting を生じないヘルツ応力をDINのK値から決定する。DINでは、車輪荷重Pは次式で与えられ (DIN 15070)

$$P = K \cdot B \cdot D \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (\text{kg})$$

$$K : \text{材料の面圧係数} \left(K C_1 = 2.86 \times \frac{\sigma_{\max}^2}{E} \right)$$

B : レール踏面有効巾 (cm)

D : 車輪直径 (cm)

C₁ : 材料係数

C₂ : 回転係数 (C₂ = 1 at ローラ回転数 32 rpm)

C₃ : 作業時間係数 (C₃ = 1 at 稼働率 25~40%)

Pitting を生じない許容ヘルツ面圧 P は、材料により KC_1 値として実験的に与えられている。

② 車輪材質 S45C, 焼ならしの場合

$$KC_1 = 56 \times 1.0 = 56 \text{ kg/cm}^2$$

ヘルツ面圧としては

$$KC_1 = 2.86 \times \frac{\sigma_{\max}^2}{E}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= 0.59 \sqrt{KC_1 \cdot E} \\ &= 65 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

S45C (焼ならし) の降伏点 σ_s は

$$\sigma_s = 35 \text{ kg/mm}^2$$

$$\therefore \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s} = \frac{65}{35} = 1.86$$

③ 車輪材質 SC46 の場合

$$KC_1 = 56 \times 0.5 = 28 \text{ kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= 0.59 \sqrt{28 \times 2.1 \times 10^6} \\ &= 4520 \text{ kg/cm}^2 = 45.2 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

SC46 の降伏応力 σ_s は $\sigma_s = 23 \text{ kg/mm}^2$

$$\therefore \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s} = \frac{45.2}{23} = 1.97$$

ステンレス鋼の場合のデータは無いが、上記の試算から降伏応力の 1.8 倍程度を許容値と考えれば良い。

	$\sigma_{0.2}$	σ_b
SUS 304L	24.0	57.0
YUS 304N	49.3	82.9

の値よりヘルツ応力の許容値として

$$\begin{aligned} \text{SUS 304L} \quad \sigma_{\max} &= 43.2 \text{ kg/mm}^2 \\ \text{YUS 304N} \quad \sigma_{\max} &= 88.7 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

安全をみて YUS 304N の場合

$$\sigma_{\max} \times \frac{2}{3} = 59.1 \text{ kg/mm}^2$$

を許容値とみれば充分であろう。

したがって、今回の車輪材質に YUS 304N を使用する。また、レール材質に関しては、SUS 304L 相当で問題ない。

(ii) 軸受

① 台車A

軸径： 300 mm 軸受巾： 150 mm とすると

軸受の面圧 P は

$$P = \frac{Q}{d \times 2b}$$

$$= \frac{108000 \text{ kg}}{30 \text{ cm} \times 2 \times 15 \text{ cm}} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

したがって、軸受材料としては、Table 3.1 に示されているようにリン青銅（最大許容圧力150～600 kg/cm²）程度の通常の軸受を使用すれば良い。以下、同様にして各台車の軸受面圧を求める。

⊕ 台車B $P = \frac{60000 \text{ kg}}{15 \times 2 \times 15} = 133 \text{ kg/cm}^2$

⊙ 台車C $P = \frac{97000 \text{ kg}}{30 \times 2 \times 15} = 108 \text{ kg/cm}^2$

⊖ 台車D $P = \frac{103000 \text{ kg}}{30 \times 2 \times 15} = 114 \text{ kg/cm}^2$

Table 3.1 すべり軸受用金属材料の性能¹⁾

軸受材料	およその かたさ HB	軸の最小 かたさ HB	最大許容 圧力 kg/cm ²	最高許容 温度 ℃	焼けつき やすさ*	なじみ やすさ*	耐食性*	疲れ 強さ*
鋳鉄	160～180	200～250	30～60	150	4	5	1	1
砲金	50～100	200	70～200	200	3	5	1	1
黄銅	50～150	200	70～200	200	3	5	1	1
りん青銅	100～200	300	150～600	250	5	5	1	1
Sn基ホワイトメタル	20～30	<150	60～100	150	1	1	1	5
Pb基ホワイトメタル	15～20	<150	60～80	150	1	1	3	5
アルカリ硬化鉛	22～26	200～250	80～100	250	2	1	5	5
カドミウム合金	30～40	200～250	100～140	250	1	2	5	4
鉛銅	20～30	300	100～180	170	2	2	5	3
鉛青銅	40～80	300	200～320	220～250	3	4	4	2
アルミ合金	45～50	300	280	100～150	5	3	1	2
銀（薄層被覆つき）	25	300	<300	250	2	3	1	1
三層メタル（ホワイト被覆）		<230	<300	100～150	1	2	2	3

*印は順位を示し、1を最良とする。

(iii) 軸受構造

台車A, C, Dの軸受構造を Fig. 3.1に, 台車Bの軸受構造を Fig. 3.2に示す。

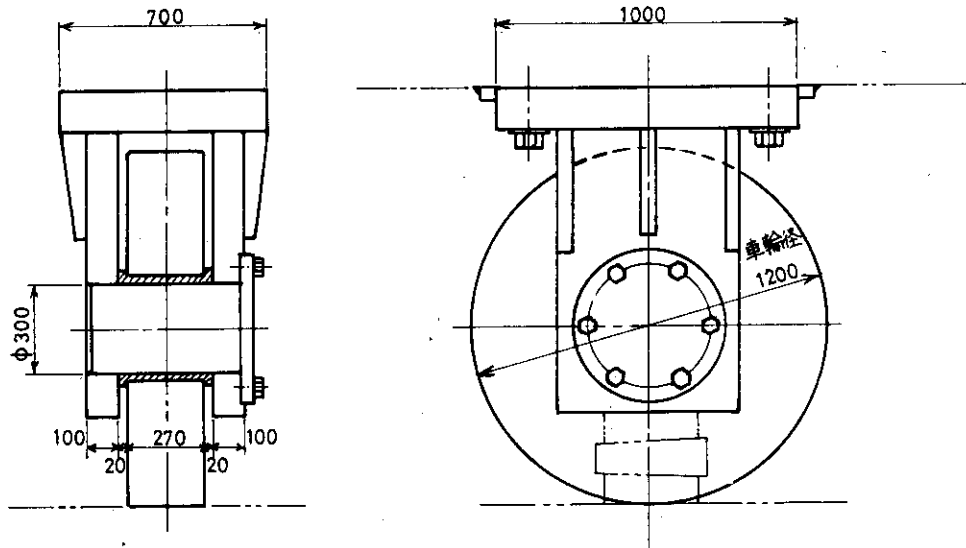


Fig. 3.1 台車A, C, Dの軸受構造

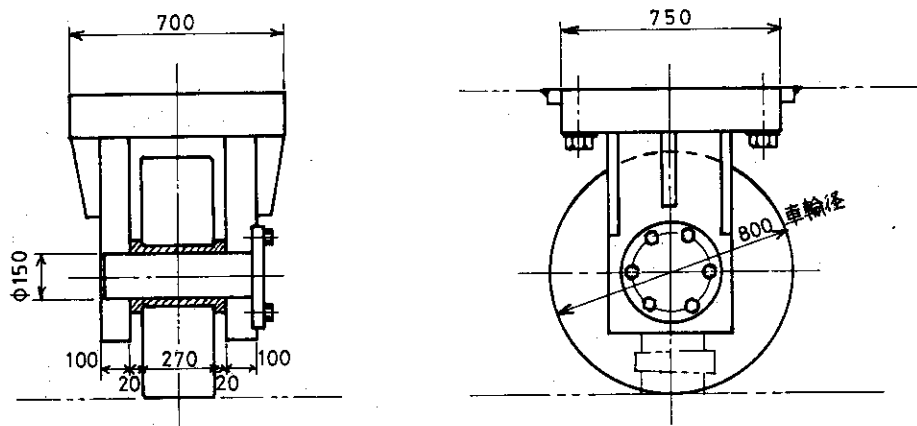


Fig. 3.2 台車Bの軸受構造

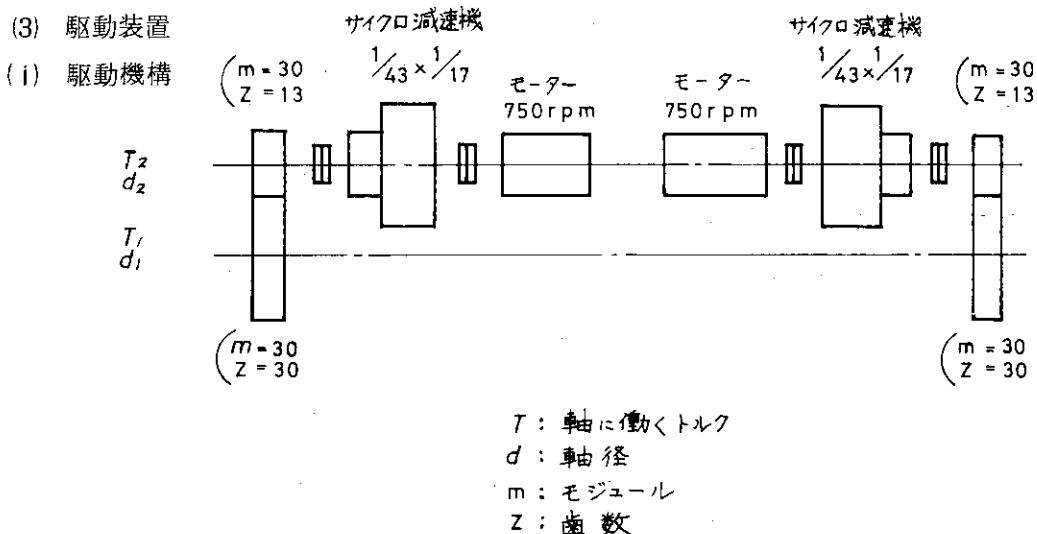


Fig. 3.3 駆動機構

駆動は、Fig. 3.3.のように床面にラックを配し、駆動装置の歯車で駆動するラックピニオン方式*とする。走行速度は20mm/secである。

(ii) 走行抵抗

車輪の走行抵抗は次式で与えられる。

(Fig. 3.4)

$$W_r = \frac{1000 \cdot Q}{R} (\mu \cdot \frac{d}{2} + f)$$

- Q: 軸重 (TON)
- R: 車輪半径 (cm)
- d: 軸受部車軸直径 (cm)
- μ : 車軸周上の摩擦抵抗
 滑り軸受 $\mu = 0.1$ (動摩擦)
 $\mu = 0.2$ (静摩擦)
- f: ヘルツの公式により決まる偏心量 (cm)

W_r : 走行抵抗 (kg)

台車Aの走行抵抗, 走行時 W_{rA} , 起動時 W'_{rA} とすると,

$$f_A = 1.522 \sqrt{\frac{Q \cdot R}{E \cdot B}} \quad (B: \text{車輪巾})$$

$$= 1.522 \sqrt{\frac{108000 \times 60}{2.1 \times 10^8 \times 27}} = 0.51 \text{ (cm)}$$

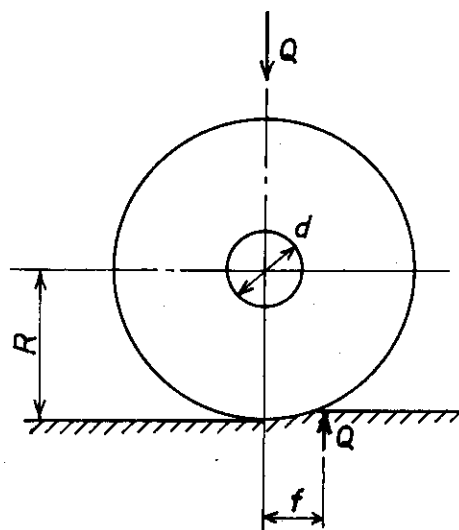


Fig. 3.4 車輪モデル

* 駆動を電動機による車輪駆動とした場合、駆動力としては、(駆動車輪の荷重) × (摩擦係数)となる。この場合での検討では、台車Cと車輪16ケ中10ケ程度の車輪を駆動する必要があり、この車輪駆動方式は合理的でなくここでは検討しない。

$$W_{rA} = \frac{1000 \times 108}{60} \left(0.1 \times \frac{30}{2} + 0.51 \right) \times 10 \text{ 個} \approx 36^t 200 \text{ kg}$$

$$W'_{rA} = \frac{1000 \times 108}{60} \left(0.2 \times \frac{30}{2} + 0.51 \right) \times 10 \approx 63^t 200 \text{ kg}$$

台車Bの走行抵抗, 走行時 W_{rB} , 起動時 W'_{rB} とすると

$$f_B = 1.522 \sqrt{\frac{60000 \times 40}{2.1 \times 10^6 \times 27}} = 0.31 \text{ (cm)}$$

$$W_{rB} = \frac{1000 \times 60}{40} \left(0.1 \times \frac{15}{2} + 0.31 \right) \times 8 \text{ 個} \approx 12^t 720 \text{ kg}$$

$$W'_{rB} = \frac{1000 \times 60}{40} \left(0.2 \times \frac{15}{2} + 0.31 \right) \times 8 \text{ 個} \approx 21^t 720 \text{ kg}$$

台車Cの走行抵抗, 走行時 W_{rc} とすると

$$f_c = 1.522 \sqrt{\frac{97000 \times 60}{2.1 \times 10^6 \times 27}} = 0.49 \text{ (cm)}$$

$$W_{rc} = \frac{1000 \times 97}{60} \left(0.1 \times \frac{30}{2} + 0.49 \right) \times 16 \text{ 個} \approx 51^t 500 \text{ kg}$$

$$W'_{rc} = \frac{1000 \times 97}{60} \left(0.2 \times \frac{30}{2} + 0.49 \right) \times 16 \approx 90^t 300 \text{ kg}$$

したがって, 炉モジュールを移動させるのに必要な力は, 走行時 F , 起動時 F' とすれば

$$\begin{aligned} F &= W_{rA} + W_{rB} + W_{rc} \\ &= 36.2 + 12.7 + 51.5 \\ &= 100.4 \text{ t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F' &= W'_{rA} + W'_{rB} + W'_{rc} \\ &= 63.2 + 21.7 + 90.3 \\ &= 175.2 \text{ t} \end{aligned}$$

(iii) モータ所要馬力

Fig. 3.3 の駆動機構において, 各歯車のトルク, 接線力, 軸径を Table 3.2 にまとめた。

Table 3.2 駆動装置歯車のトルク, 接線力, 軸径

記号	T (t·m)	P (t)	T' (t·m)	P' (t)	d (mm)
1	2 2.6	5 0.2	3 9.4	8 7.6	2 7 5
2	1 0.3	5 2.8	1 8.0	9 2.3	2 1 5

注) T : 走行時のトルク P : 走行時の接線力
 T' : 起動時のトルク P' : 起動時の接線力
 d : 軸径

起動時には, 起動抵抗が働き, 走行時よりも余分な動力を必要とするが, モータにおいては,

オーバーロードで使用できるので走行時の動力について算出する。

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{T \cdot N}{974} \\
 &= \frac{10.3 \times 10^3}{974} \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{17} \times \frac{1}{0.75} \times 750 \\
 &= 14.5 \text{ (kW)}
 \end{aligned}$$

したがって、15kWのモータを2台使用する。

(IV) 歯車の強度

歯車としては、使用頻度が非常に少ないので曲げ強度のみを考慮する。

Lewis の式より

$$P = K_b \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \cdot t \cdot b \cdot y$$

P ; ピッチ円上の伝達可能接線力

K_b ; 材料による許容応力 Ni-Cr鋼 K_b : 5000~6000kg/cm²

ζ_1 ; 速度係数 $\zeta_1 = \frac{3}{v+3} \approx 1$ (v : m/sec)

ζ_2 ; 荷重係数 $\zeta_2 = 0.74$

ζ_3 ; かみ合い係数 $\zeta_3 = 1$

t ; 円ピッチ (cm) = $\frac{\pi m}{10}$

b ; 歯幅 (cm)

y ; 歯数と歯車による係数 (Table 3.3 参照)

Table 3.3 平歯車の歯形係数 y ²⁾

歯 数	並 歯 $\alpha_c = 14.5^\circ$		並 歯 $\alpha_c = 20^\circ$		スタ ッ プ $\alpha_c = 20^\circ$		内 歯 車			
							平小歯車		内歯車	
12	0.067	*0.113	0.078	*0.132	0.099	*0.158	0.104	*0.207	-	*
13	0.071	0.120	0.083	0.141	0.103	0.164	0.104	0.208	-	-
14	0.075	0.127	0.088	0.149	0.108	0.172	0.105	0.209	-	-
15	0.078	0.132	0.092	0.156	0.111	0.177	0.105	0.210	-	-
16	0.081	0.137	0.094	0.160	0.115	0.184	0.106	0.211	-	-
17	0.084	0.142	0.096	0.163	0.117	0.187	0.109	0.215	-	-
18	0.086	0.146	0.098	0.166	0.120	0.192	0.111	0.218	-	-
19	0.088	0.150	0.100	0.170	0.123	0.196	0.114	0.222	-	-
20	0.090	0.153	0.102	0.173	0.125	0.200	0.116	0.225	-	-
21	0.092	0.156	0.104	0.176	0.127	0.203	0.118	0.228	-	-
22	0.093	0.158	0.105	0.178	0.129	0.206	0.119	0.230	-	-
24	0.095	0.162	0.107	0.182	0.132	0.201	0.122	0.233	-	-
26	0.098	0.166	0.110	0.187	0.135	0.216	0.125	0.236	-	-
28	0.100	0.170	0.112	0.190	0.137	0.219	0.127	0.239	0.220	0.400
30	0.101	0.172	0.114	0.193	0.139	0.222	0.129	0.242	0.216	0.395
34	0.104	0.176	0.118	0.200	0.142	0.227	0.132	0.246	0.210	0.387
38	0.106	0.180	0.122	0.207	0.145	0.232	0.135	0.250	0.205	0.380
43	0.108	0.183	0.126	0.214	0.147	0.235	0.137	0.253	0.200	0.372
50	0.110	0.187	0.130	0.221	0.151	0.241	0.139	0.256	0.195	0.364
60	0.113	0.192	0.134	0.227	0.154	0.246	0.142	0.260	0.190	0.356
75	0.115	0.195	0.138	0.234	0.153	0.222	0.144	0.264	0.185	0.348
100	0.117	0.198	0.142	0.241	0.161	0.257	0.147	0.268	0.180	0.340
150	0.119	0.202	0.146	0.248	0.165	0.264	0.149	0.272	0.175	0.332
300	0.122	0.207	0.150	0.255	0.170	0.272	0.152	0.276	0.170	0.325
ラック	0.124	0.210	0.154	0.262	0.175	0.280	-	-	-	-

備考: *印は高静度歯車用

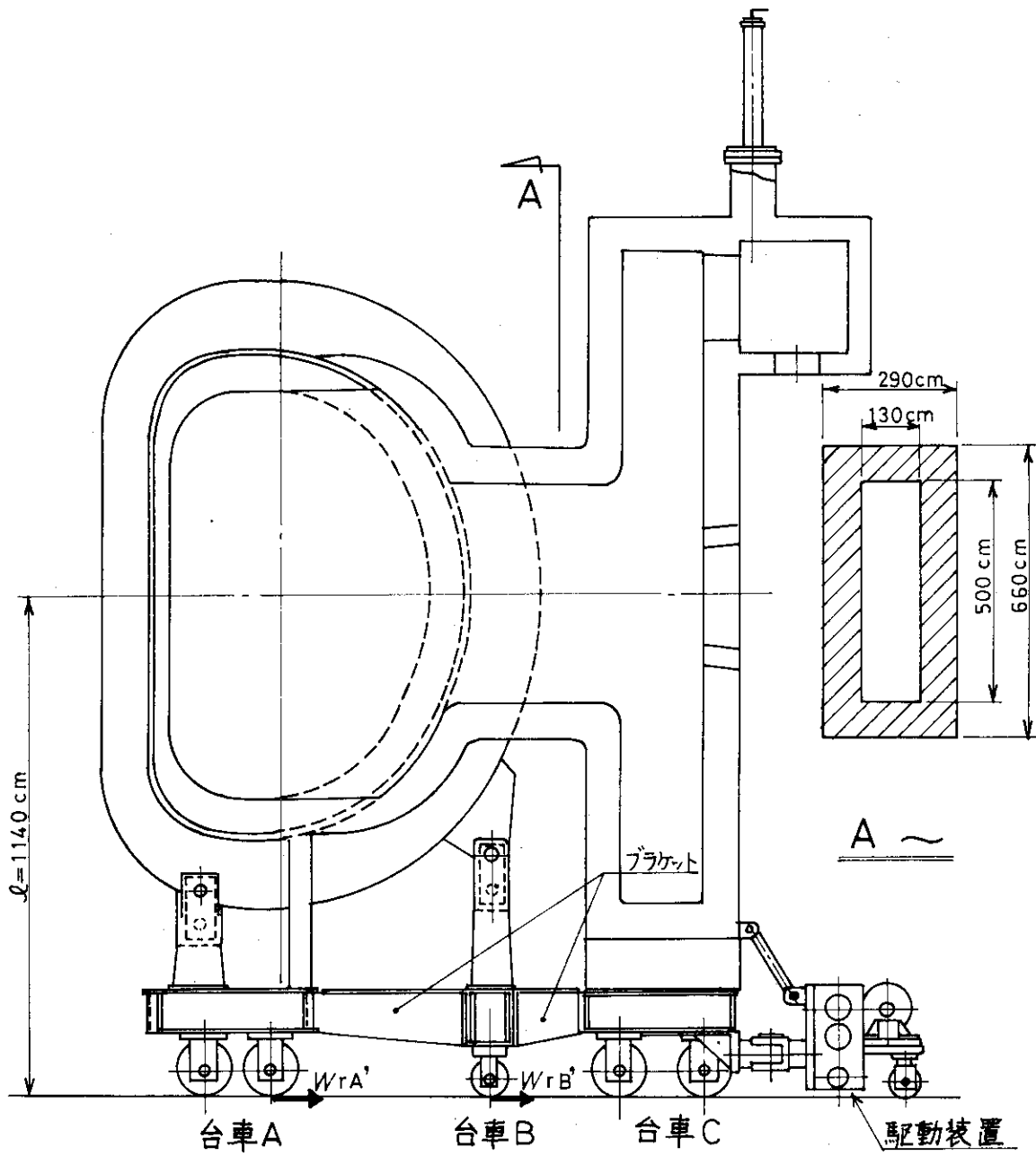


Fig. 3.5 炉モジュール概念図

Lewis の式により算出した値をまとめると、Table 3.4 のようになる。

Table 3.4 駆動装置歯車の仕様及び接線力

記号	モジュール M	歯数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	歯幅 B (mm)	接線力 P' (t)	伝達可能接線力 P'' (t)
1	30	30	900	250	87.6	99.4
2	30	13	390	350	92.3	101.3

(4) その他

引出用台車AとBの走行抵抗は、炉モジュールの炉心部とポート部の接続部分を介して駆動装置に伝達させる (Fig. 3.5)。したがって、接続部にはそれ相当の剛性強度が必要である。

接続部に働く曲げモーメントは

$$\begin{aligned} M &= (W'_{rA} + W'_{rB}) \times \ell \\ &= (63^t 200 \text{ kg} + 21^t 700 \text{ kg}) \times 1140 \text{ cm} \\ &= 9.7 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

接続部の断面係数： Z

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{6} \cdot \frac{(b_2 h_2^3 - b_1 h_1^3)}{h_2} \\ &= \frac{1}{6} \times \frac{290 \times 660^3 - 130 \times 500^3}{660} \\ &= 1.7 \times 10^7 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

接続部の曲げ応力 σ は

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{9.7 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{1.7 \times 10^7 \text{ cm}^3} = 5.7 \text{ kg/cm}^2$$

コンクリートの許容曲げ応力は、[5.1(1)遮蔽コンクリートの評価 Table 5.6]により長期… 13.3 kg/cm^2 、短期… 26.7 kg/cm^2 と推定した。但し、この接続部は重コンクリートであるから、それらの値(普通コンクリート)よりも大きくなると考えられる。いずれにしても、接続部の曲げ応力は許容値以内である。したがって、移送時の走行抵抗に関しては問題ない。

参考文献

- 1) 機械工学便覧 日本機械学会編 (1968)
- 2) 「設計家の歯車」平 次郎著 理工学書

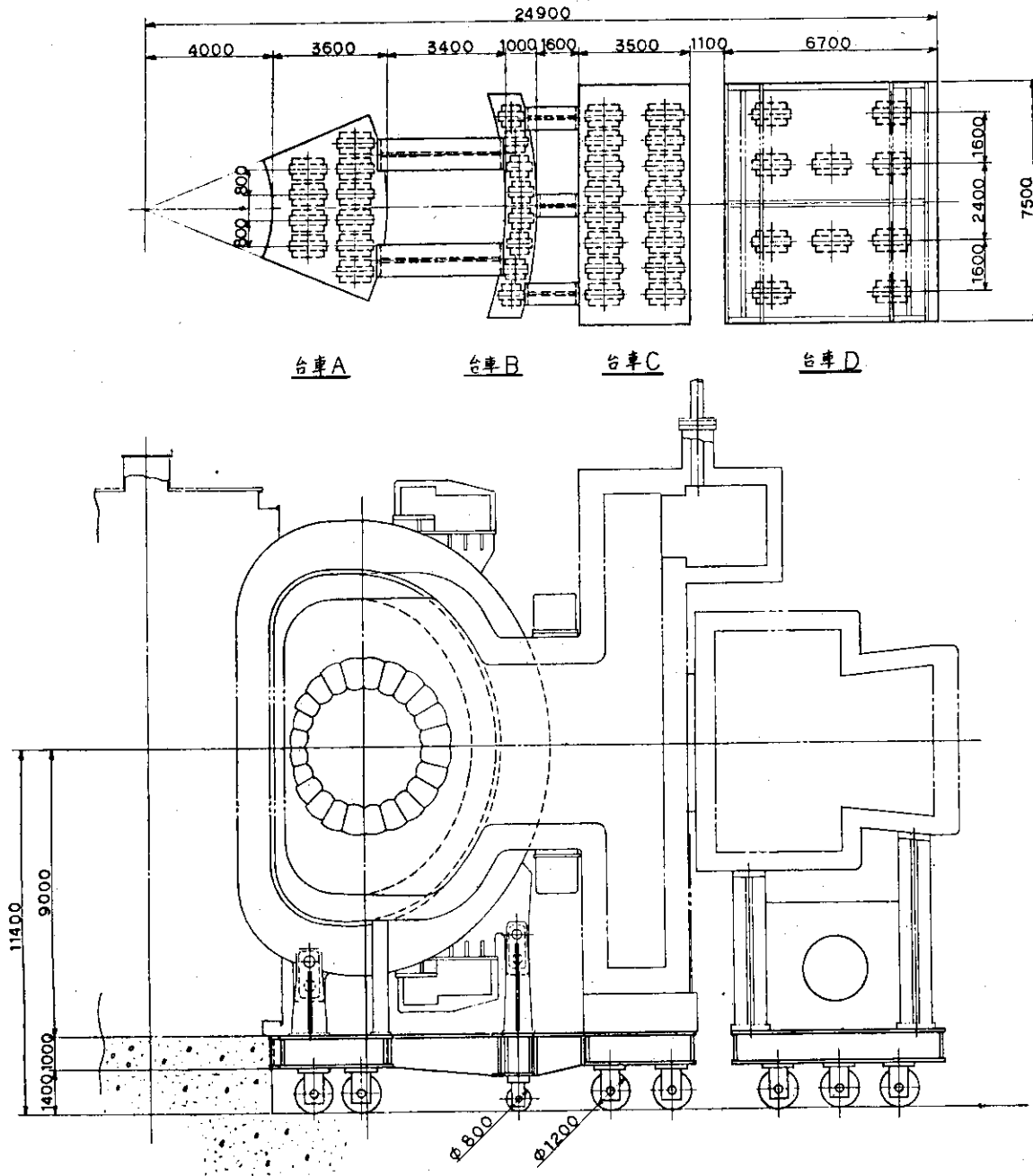


Fig. 3.6 引出用台車

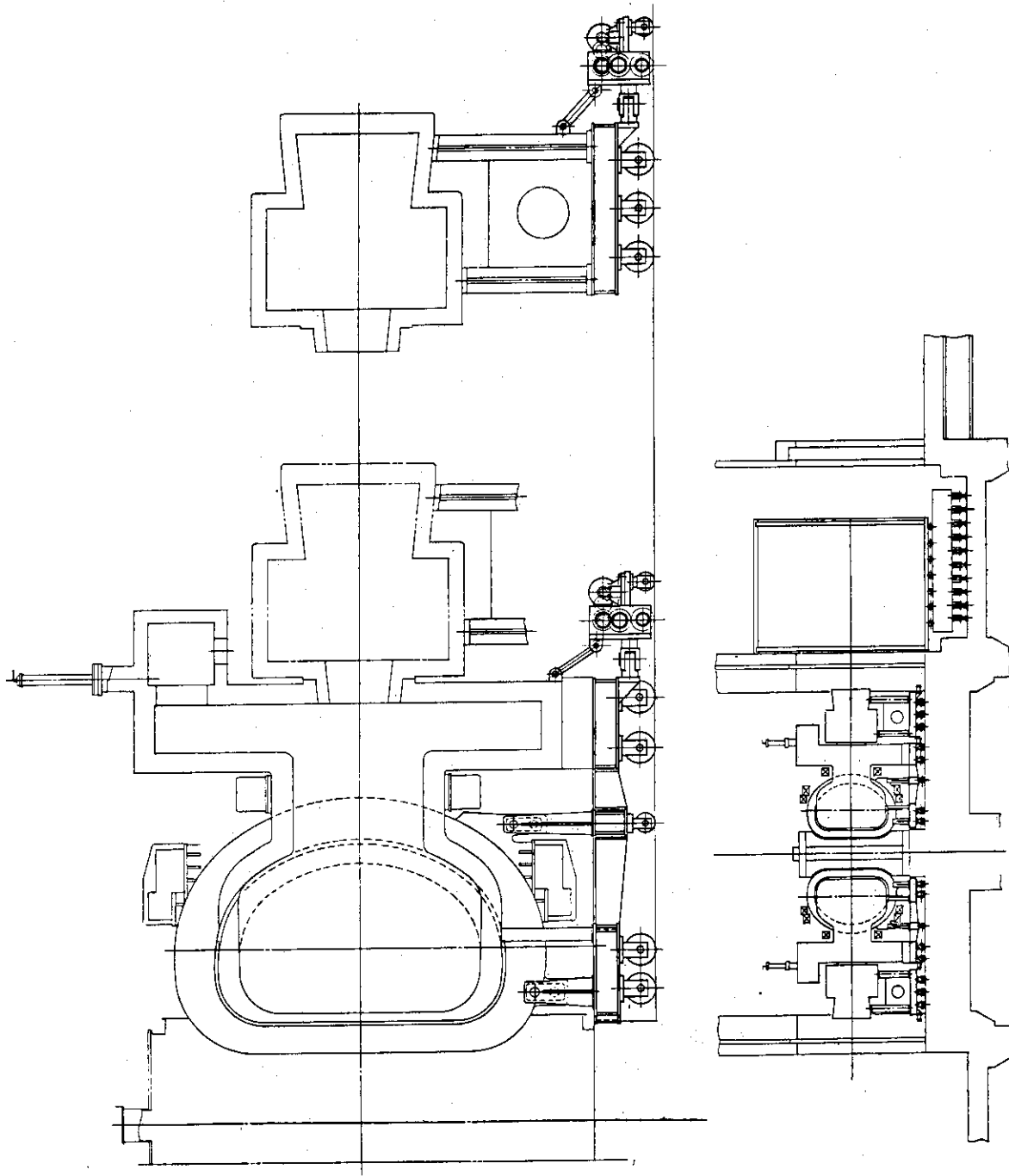


Fig. 3.7 炉モジュール引出概念図

3.2 旋回用台車の設計

(1) 概要

1.2項で述べた設計方針に基づき、車輪方式及びエア-ベアリング方式による旋回台車の設計を行った。

車輪方式の旋回台車は、炉室のまわりに沿った旋回軌道上を任意の位置に停止することができる。80ケの車輪を備え、4ケのガイドローラで案内されながら旋回軌道半周を約1時間で旋回する (Fig. 3.16 参照)

エアベアリング方式の旋回台車は、平坦な旋回軌道上を80ケのエアベアリングによって支えられながら旋回する。駆動装置を前後に2ケずつ備え、半周を3時間で牽引する。

(Fig. 3.20参照)

両方式共に遮蔽室移動装置を設けており、遮蔽室を内側あるいは外側に移動させることができる。また炉モジュールを炉室から旋回台車、旋回台車から修理室に渡すときにぴったりと床面が合うように、ジャッキによる上下方向の調整機構も備えている。

まとめの項では、両方式の長所、短所を挙げ比較検討した。

(2) 遮蔽室の検討

遮蔽室の形状は、炉モジュール (移動台車を含む) との取合いより

内部寸法; 10 m (幅) × 19 m (長さ) × 26 m (高さ)

とする。

遮蔽室重量は、大略10,300トンとなる。

(3) 車輪方式による旋回台車

① 台車重量

遮蔽室と炉モジュールの重量を受ける台車の構造は、150 mmと100 mmのSUS板を使用する。

概略計算すると1800トンになる。

② 車輪の形状

直径2 m, 幅0.5 mの車輪を80ケ用いる。

車輪重量は、約1000トンである。したがって、車輪が受ける荷重は、次のようになる。

遮蔽室	10,300
炉モジュール	3,000
台車	1,800
車輪	1,000

計 16,100 トン

ヘルツの面圧は、次式で与えられる。

$$P_{\max} = 0.59 \sqrt{\frac{P \cdot E}{d}}$$

P': 車輪の単位長さ当りの平均荷重

E: ヤング率 d: 車輪の直径

$$\begin{aligned} \therefore P_{\max} &= 0.59 \sqrt{\frac{1.61 \times 10^7 \times 2.1 \times 10^6}{2 \times 0.5 \times 80 \times 10^4}} \times 10^{-2} \\ &= 38.6 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

車輪材としては、YUS 304N (許容面圧 59.1 kg/mm²) 相当品が適当であろう。

又、車輪の形状は Fig. 3.8 のようにテーパ形状とし旋回によるすべりを軽減すればよい。

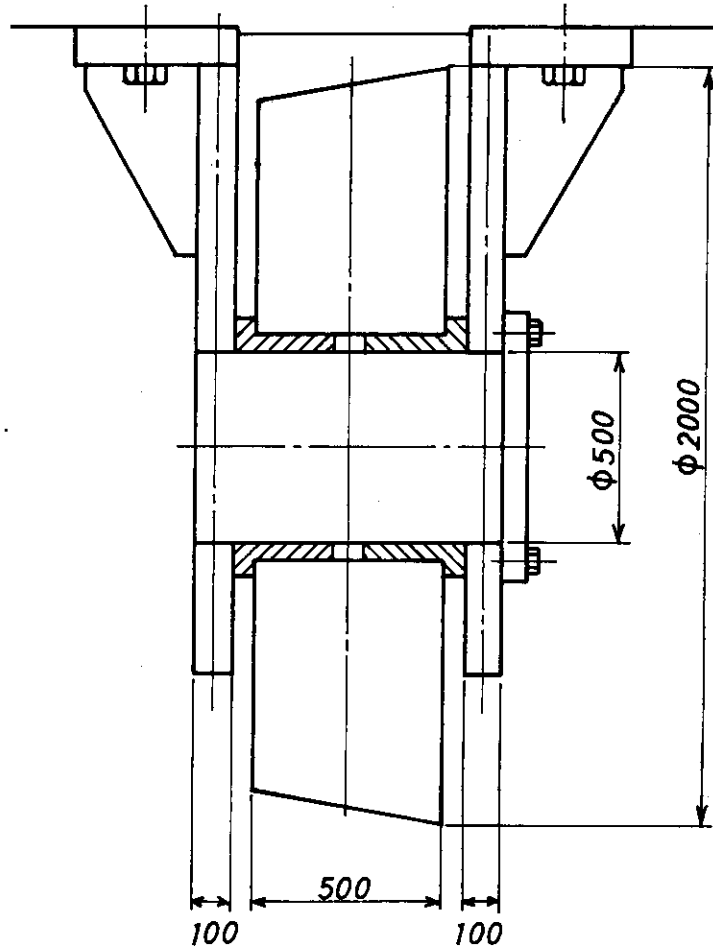


Fig. 3.8 車輪構造

③ 軸受の形状

軸径 500 mm, 軸受幅 275 mm

軸受の面圧 P は

$$\begin{aligned} P &= \frac{Q}{d \times 2b} \\ &= \frac{1.63 \times 10^7 / 80}{50 \times 2 \times 27.5} \\ &= 74 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

従って軸受材料としては、黄銅程度の通常の軸受を使用すればよい。

但し、潤滑油は使用出来ないので、軸受表面に MoS₂ 又は WS₂ の固体潤滑油膜をコーテ

ィングして焼付防止をする必要がある。

④ 旋回台車駆動装置

(i) 駆動機構

(外周)

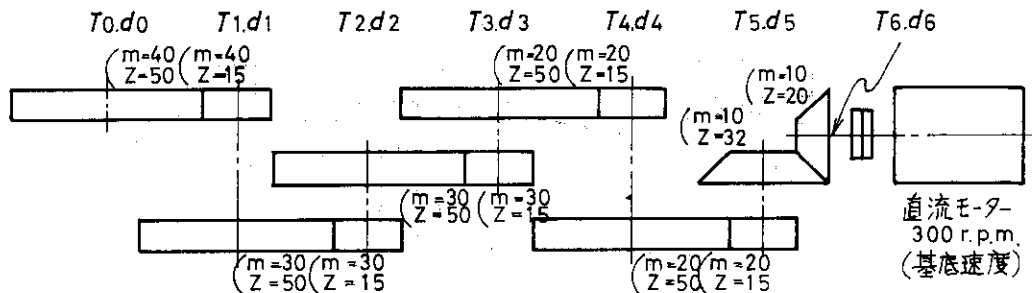


Fig. 3.9 外周駆動機構

(内周)

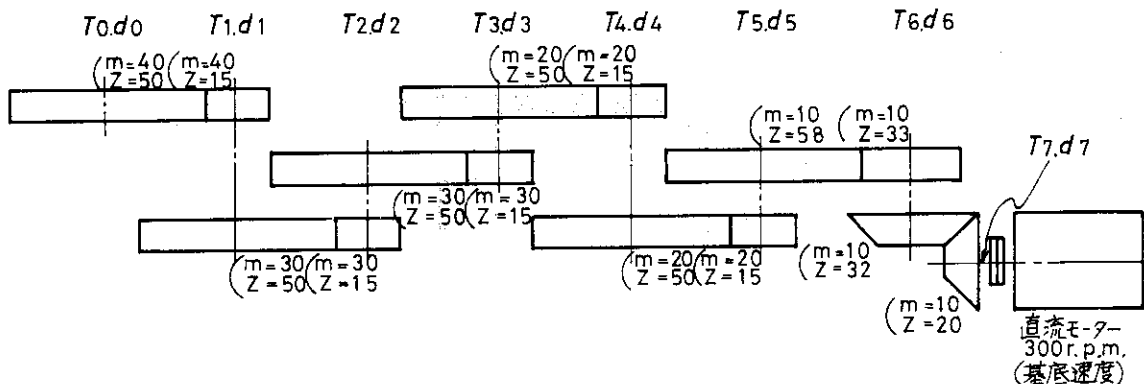


Fig.3.10 内周駆動機構

旋回方向の位置決めが必要となるので、低速であり、かつ、確実な伝達機構が望ましい。ここでは、Fig. 3.9, 3.10 に示すように旋回軌道の内外周壁にラックを配し、台車側に駆動ギヤを配する機構とする。この駆動装置を外周に2個、内周に2個それぞれ装備するものとする。

本機構によると、旋回軌道半周を約1時間で旋回する。

(ii) 走行抵抗

走行抵抗を引出用台車と同様に計算すると

$$\text{起動時 } W_{r1} = 924 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{走行時 } W_{r2} = 517 \times 10^3 \text{ kg}$$

となる。

(iii) モータ所要馬力

4個の駆動ギヤに均等に荷重がかかるものとして検討すると、Fig. 3.9, 3.10 に対応して

Table 3.5, 3.6のようにまとめられる。

Table 3.5 外周駆動装置歯車のトルク, 接線力, 軸径

外周

記号	T (t·m)	P(t) $\frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	T' (t·m)	P'(t) $\frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	d (mm)
0	—	129.3	—	235.5	500
1	40.8	$\frac{136.1}{54.4}$	74.4	$\frac{247.9}{99.2}$	350
2	12.9	$\frac{57.3}{17.2}$	23.5	$\frac{104.4}{31.3}$	230
3	4.1	$\frac{18.2}{8.2}$	7.4	$\frac{32.9}{14.8}$	160
4	1.3	$\frac{8.7}{2.6}$	2.3	$\frac{15.3}{4.6}$	110
5	0.4	$\frac{2.7}{2.5}$	0.7	$\frac{4.7}{4.4}$	75
6	0.3	3.0	0.5	5.0	65

Table 3.6 内周駆動装置歯車のトルク, 接線力, 軸径

内周

記号	T (t·m)	P(t) $\frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	T' (t·m)	P'(t) $\frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	d (mm)
0	—	129.3	—	235.5	500
1	40.8	$\frac{136.1}{54.4}$	74.4	$\frac{247.9}{99.2}$	350
2	12.9	$\frac{57.3}{17.2}$	23.5	$\frac{104.4}{31.3}$	230
3	4.1	$\frac{18.2}{8.2}$	7.4	$\frac{32.9}{14.8}$	160
4	1.3	$\frac{8.7}{2.6}$	2.3	$\frac{15.3}{4.6}$	110
5	0.4	$\frac{2.7}{1.4}$	0.7	$\frac{4.7}{2.4}$	75
6	0.24	$\frac{1.5}{1.5}$	0.42	$\frac{2.5}{2.6}$	60
7	0.16	1.6	0.28	2.8	55

モータ所要馬力は次式で与えられる。

$$H = \frac{T \cdot N}{974} \quad N ; \text{モータ回転数 } 300 \text{ r.p.m.}$$

したがって, モータ所要馬力は,

外周

$$H = \frac{0.3 \times 10^3 \times 300}{974} = 92.4 \text{ kW}$$

内周

$$H = \frac{0.16 \times 10^3 \times 300}{974} = 49.3 \text{ kW}$$

となる。

モータ馬力は、外周 110kW, 内周 55kW を選定する。

(iv) 歯車の強度

歯車としては使用頻度が非常に少ないので曲げ強度のみを考慮する。

Lewisの式より

$$P = K_b \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \cdot t \cdot b \cdot y$$

P ; ピッチ円上の伝達可能接線力 (kg)

K_b ; 材料による許容応力 Ni-Cr鋼 $K_b = 5000 \sim 6000 \text{ kg/cm}^2$

ζ_1 ; 速度係数 $\zeta_1 = 3/(v+3) \approx 1$ ($v = \text{m/sec}$)

ζ_2 ; 荷重係数 $\zeta_2 = 0.74$

ζ_3 ; かみ合い係数 $\zeta_3 = 1$

t ; 円ピッチ (cm)

b ; 歯幅 (cm)

y ; 歯数と歯形による係数

かさ歯車については、

$$P = \frac{2}{3} K_b \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \cdot t \cdot b \cdot y$$

となる。ここで、y は次式で与えられる歯数に相当する平歯車により決定される。

$$Z' = \frac{Z}{\cos \delta} \quad Z ; \text{かさ歯車の実際の歯数}$$

$$\delta ; \text{ピッチ円スイ角 (45^\circ)}$$

P は、外端のピッチ円周に集中していると考えた負荷である。

b は、ピッチ円スイ母線の長さの $\frac{1}{3}$ と考えたものである。

Table 3.7 と 3.8 は、前式によって求めた各歯車の仕様である。

Table 3.7 外周駆動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯車 Z	ピッチ円直径 D (mm)	歯幅 b (mm)	接線力 P' (t)	伝達可能接線力 P' (t)
0	40	50	2000	580	235.5	350.5
1	40	15	600	580	247.9	248.0
	30	50	1500	330	99.2	149.5
2	30	15	450	330	104.4	105.8
	30	50	1500	110	31.3	49.8
3	30	15	450	110	32.9	35.3
	20	50	1000	75	14.8	22.7
4	20	15	300	75	15.3	16.0
	20	50	1000	50	4.6	15.1
5	20	15	300	50	4.7	10.7
	10	32 (45)	320	60	4.4	5.9
6	10	20 (28)	200	60	5.0	5.2

Table 3.8 内周駆動装置歯車の仕様

内周

記号	モジュール M	歯数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	歯幅 b (mm)	接線力 P' (t)	伝達可能接線力 P' (t)
0	40	50	2000	580	235.5	350.5
1	40	15	600	580	247.9	248.0
	30	50	1500	330	99.2	149.5
2	30	15	450	330	104.4	105.8
	30	50	1500	110	31.3	49.8
3	30	15	450	110	32.9	35.3
	20	50	1000	75	14.8	22.7
4	20	15	300	75	15.3	16.0
	20	50	1000	50	4.6	15.1
5	20	15	300	50	4.7	10.7
	10	58	580	50	2.4	7.7
6	10	33	330	50	2.5	6.8
	10	32 (45)	320	50	2.6	5.0
7	10	20 (28)	200	50	2.8	4.3

(v) その他

以上、直流モータによる駆動装置を検討したが、油圧モータ及び交流モータによる駆動装置も考えられる。

油圧モータにおいて、例えば、定格回転数0~22r.p.m. 定格トルク3.18t・m というあるメーカーのものを使用するとすれば、減速機構は3段程度でよく、旋回軌道半周を約2時間程度で旋回可能である。しかし油の保守が大変であり、一旦油圧系統が故障すれば多量の油を取り扱うことになり好ましくない。付属機器も、油タンク、油圧ポンプ、及び配管系統等からなり、その保守も大がかりとならざるを得ない。

交流モータにおいては、直流モータに比較して回転数が高く減速機構が大がかりとなりそのためのスペースも広くとらなくてはならない。又、速度制御が不可能であるという欠点がある。

ここでは、以上のような点から比較的スペースをとらず、速度制御可能で、しかもクリーンな直流モータを採用し、油圧モータ及び交流モータについてはこれ以上検討しない。

⑤ 遮蔽室の移動装置

遮蔽室のレール面と炉室及び修理室のレール面とを密着させる為に遮蔽室を旋回台車軌道に対し直角の方向に移動させる装置である。

Fig. 3.11に示すように、駆動はラックピニオン方式とし、遮蔽室と駆動台車の間をころをしきつめる機構とした。

(ii) ころの形状

ころは、 $\phi 500 \times 5000 \ell \times 21$ 本を3列に分けて使用する。ころの重量は、約165トンとなる。

したがって、ころの全体が支える荷重は、次のようになる。

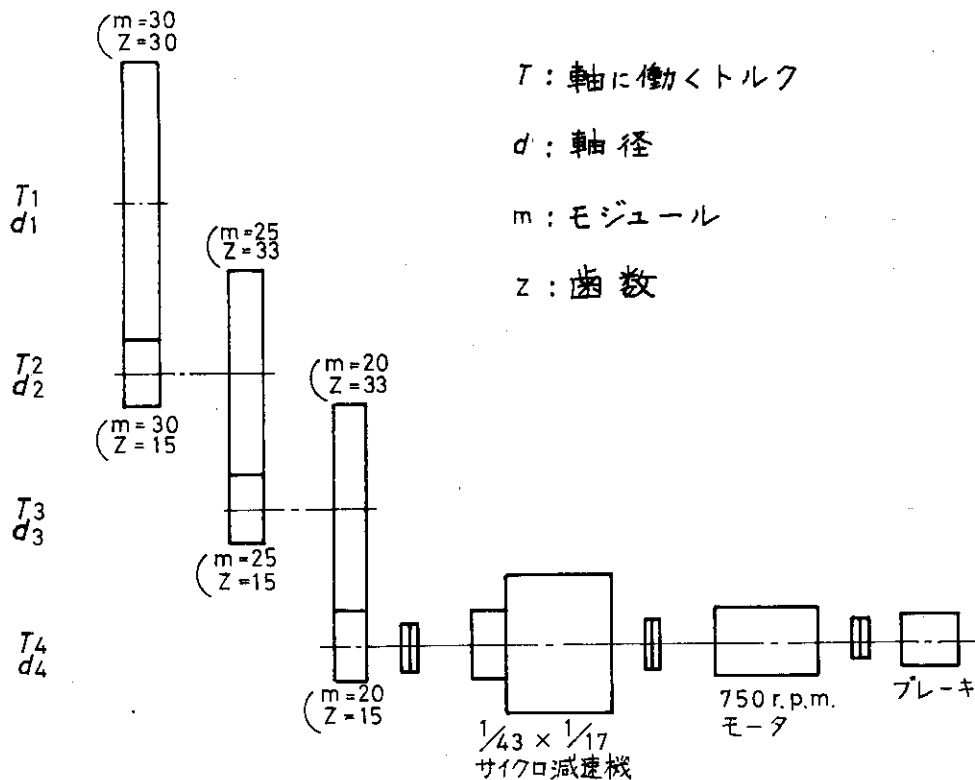


Fig. 3.11 遮蔽室移動装置の機構

遮蔽室	10,300
炉モジュール	3,000
ころ	165
合計 13,465 トン	

ヘルツの面圧は、 44.2 kg/mm^2 なので、ころの材料として、YUS 304N (許容面圧 59.1 kg/mm^2) 相当品を使用すればよい。

ころのころがり抵抗は、走行抵抗の式より約 106 トンとなる。

(iii) モータ所要馬力及び歯車の強度

旋回台車の項で述べた式により計算すると Table 3.9 のようになる。

Table 3.9 移動装置歯車のトルク、接線力、軸径

記号	T (t · m)	P(t) 小歯車	d (mm)
		P(t) 大歯車	
1	2 3.9 4	—	2 6 0
		5 3.2	
2	1 2.6	5 6.0	1 9 0
		3.1	
3	6.0 2	3.2	1 5 0
		1.8	
4	2.8 8	2.0	1 2 5
		—	

同様に、モータ所要トルクは、次のようになる。

$$T = 2880 \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{17} \times \frac{1}{0.75} = 5.25 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

所要モータ馬力は、次のようになる。

$$H = \frac{5.25 \times 750}{974} = 4.04$$

モータ馬力は、5.5 kW を選定する。

歯車の強度は Table. 3.10 のようになる。

$$K_b: 5000 \sim 6000 \text{ kg/mm}^2 \text{ (Ni-Cr 鋼 4.5\% Ni)}$$

Table. 3.10 移動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯 幅 b (mm)	歯 数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	接 線 力 P (t)	伝達可能接線力 P' (t)
1	-	-	-	-	-	-
	30	200	30	900	53.2	79.5
2	30	200	15	450	56.0	64.1
	25	50	33	825	3.1	17.0
3	25	50	15	375	3.2	13.3
	20	30	33	660	1.8	8.2
4	20	30	15	300	2.0	6.4
	-	-	-	-	-	-

⑥ ジャッキ

(i) ジャッキの機構

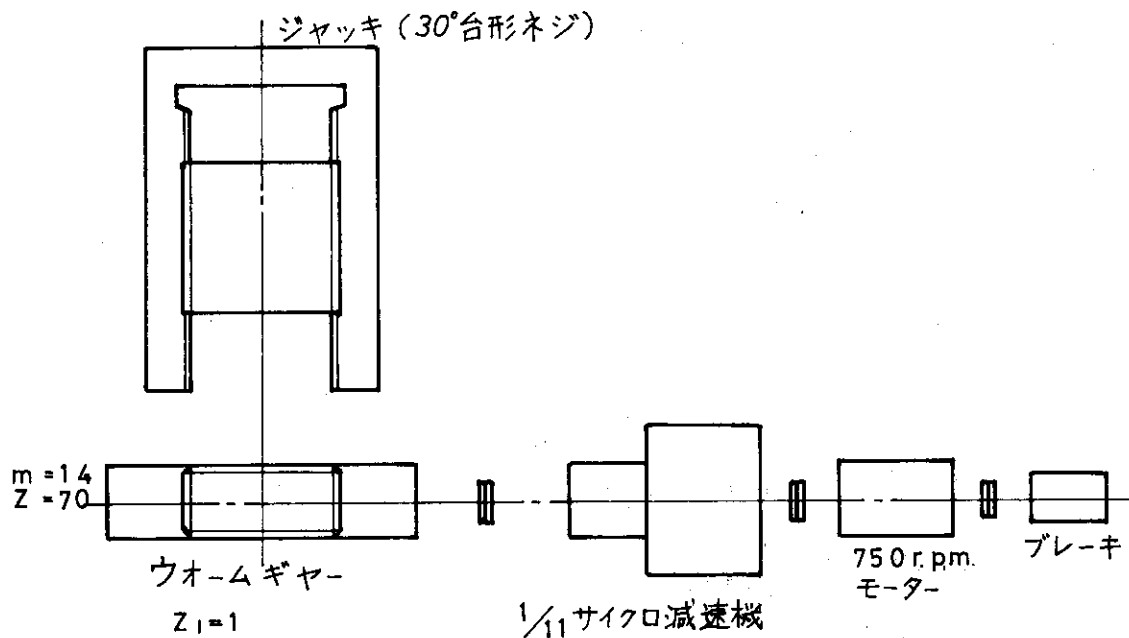


Fig. 3.12 ジャッキ機構

遮蔽室のレール端面固定用ジャッキの機構を Fig. 3.12 に示す。ここでは、ネジの推力を利用した 機械的ジャッキを検討する。ジャッキの支持する荷重は、炉モジュール走行時 2000 t 程度とする。

(ii) ネジの強度

d_1 : 外径	$\phi 600$ (mm)
d_2 : ピッチ円直径	$\phi 587$ (mm)
d_3 : おねじの谷径	$\phi 573$ (mm)
P : ピッチ	26 (mm)
Z : かみ合いネジ山数	25
q : フランク面許容面圧	1 (kg/mm ²)
h : かみ合い高さ	12 (mm)

軸方向の力、 $Q = 2000$ t が作用するので

$$\begin{aligned} q' &= \frac{Q}{\pi \cdot Z \cdot h \cdot (d_1 - h)} \\ &= \frac{2000 \times 10^3}{\pi \times 25 \times 12 \times (600 - 12)} \\ &= 3.6 \end{aligned}$$

したがって、この 30°台形ネジの必要な個数は

$$n > \frac{q'}{q} = \frac{3.6}{1}$$

となり、個数 4 個とする。

おねじの歯面に作用する最大せん断応力 τ_{\max} は、次のようになる。

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{1 + 16 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2 \tan^2 (\beta + \rho')}$$

$$\sigma = \frac{4Q}{\pi d_3^2 \times n}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \tan^{-1} \frac{P}{\pi d_3} \\ &= \tan^{-1} \frac{26}{\pi \times 573} \\ &= 0.83^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho' &= \tan^{-1} \left(\frac{\mu}{\cos \alpha'} \right) \quad \mu : \text{摩擦係数 } 0.15 \\ &= \tan^{-1} (\tan 15^\circ \times \cos \beta) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{0.15}{\cos 14.99^\circ} \right) = 14.99^\circ \\ &= 8.83^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{4 \times 2000 \times 10^3}{2 \times \pi \times 573^2 \times 4} \times \sqrt{1 + 16 \left(\frac{587}{573} \right)^2 \times \tan^2 (0.83 + 8.83)} \\ &= 0.967 \times \sqrt{1.486} \\ &= 1.18 \text{ kg/mm}^2\end{aligned}$$

一般的なSUS材の許容応力に充分である。

(iii) ギヤの強度及び所用モータ馬力

ウォームホイールの仕様を次のようにする。

- m : モジュール 14
- Z_o : 歯数 70
- b : 歯幅 111
- t_a : mπ = 14π
- σ_a : 許容曲げ応力 16.8 kg/mm²
- α : 圧力角 14.5° y : 歯形係数 0.1
- r : 進み角 r = tan⁻¹(t_a/πd₄) = 8°
- d₄ : ウォームのピッチ円直径 100
- Z₁ : ウォームの条数 1

ここでは、使用頻度が非常に少ないので曲げ強度のみ考慮する。又、ウォームのネジ山は、ウォームホイールの歯に比べて安全であるので、ウォームホイールの歯の曲げについてのみ計算する。

$$\begin{aligned}F_a &= \sigma_a \cdot y \cdot b \cdot t_a \cdot \cos r & F_a : \text{許容接線力 (kg)} \\ &= 16.8 \times 0.1 \times 111 \times \pi \times 14 \times \cos 8^\circ \\ &= 8122 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_a &= F_a \times \frac{mZ_o}{2} & T_a : \text{許容トルク (kg} \cdot \text{m)} \\ &= 8122 \times \frac{14 \times 70}{2} \times 10^{-3} \\ &= 3980 \text{ kg} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

実際には、遮蔽室端面を支持している状態では、ジャッキの移動は行なわないので、ギヤの強度としてはジャッキの重量のみで考慮すればよい。

したがって、ジャッキの推進用トルクMは、

$$\begin{aligned}M &= \frac{d_2}{2} W \tan^2(\beta + \rho') & W : \text{荷重 約 } 1700 \text{ kg} \\ &= \frac{0.587}{2} \times 1700 \times \tan^2(0.83^\circ + 8.83^\circ) \\ &= 145 \text{ kg} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

となり、充分な強度をもっている。又、このギヤは、約450t × 4基程度の荷重がかかっている状態でも駆動が可能である。

ウォーム・ギヤの効率 η は

$$\eta = \frac{\tan \gamma}{\tan(\gamma + \rho)}$$

$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\cos \alpha}\right) \quad \mu: 0.06$$

$$= \frac{\tan 8^\circ}{\tan(8^\circ + 3.5^\circ)} \quad = \tan^{-1}\left(\frac{0.06}{\cos 14.5^\circ}\right) = 3.5^\circ$$

$$= \frac{0.141}{0.203}$$

$$= 0.70$$

サイクロ減速機の効率を75%とすると、モータ所用馬力は、

$$H = 3980 \times \frac{1}{11} \times \frac{1}{70} \times 750 \times \frac{1}{974} \times \frac{1}{0.7} \times \frac{1}{0.75}$$

$$= 7.6 \text{ kW}$$

となる。

モータ馬力は、11kWを選定する。

(4) エア-ベアリング方式による旋回台車

① エア-ベアリングの選定

ここでは、市販品の最大能力のものとして次の仕様のものを使用する (Fig. 3.13)。

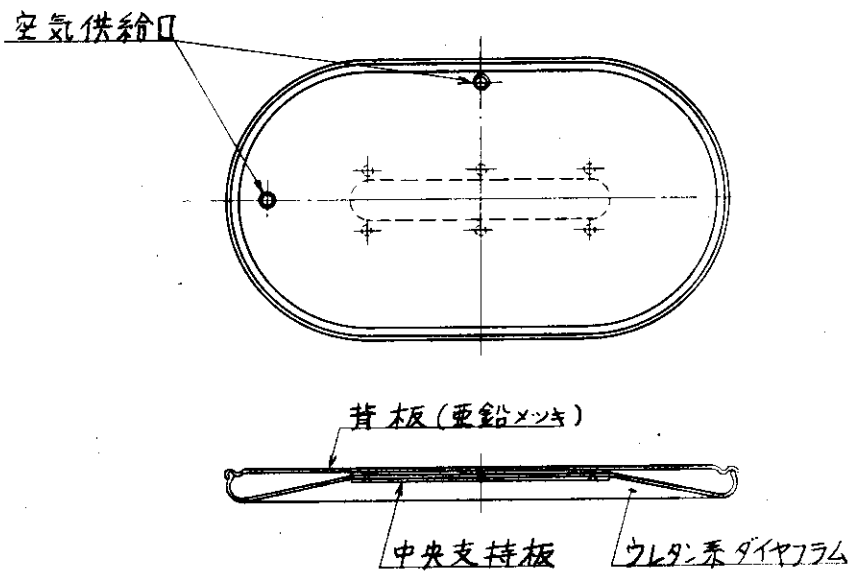


Fig. 3.13 楕円形エア-ベアリング

長円形エア-ベアリング

寸法	: 2440 × 3660
有効面積	: 6.62 (m ²)
空気消費量	: 3.0~4.5 (Nm ³ /min)
支持圧	: 3.5 (kg/cm ²)
支持能力	: 230 (ton)

このエア-ベアリングを 80 ケ使用するものとすると、このエア-ベアリングの支持能力は、
 $230 \times 80 = 18400 \text{ ton}$
 となる。

台車の構造は、150 mm と 100 mm の SUS 板を使い、その重量は約 4200 トンとなる。

したがって、エア-ベアリングが支持しなければならない重量は、

遮蔽室	10300
炉モジュール	3000
台車	4200
合計	17500 トン

となり、このエア-ベアリングの能力で充分である。

空気消費量は、

$$4.5 \times 80 = 360 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

4 台の圧縮機を使用するとして

$$360 \div 4 = 90 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

空気圧縮機の仕様は、

定格容量	: 113 m ³ /min
馬力	: 660 kW
寸法	: 4300 ^L × 1600 ^W × 2000 ^H
重量	: 11 ton

以上のような仕様のものであれば市販のもので充分まかなえる。

エア-ベアリングの数が 80 ケにもなり、その故障、修理の困難さが考えられるが、修理時には、円周方向にエア-ベアリングを引き抜き、適当な処置の後差し込むことで解決する。

② 駆動装置

(i) 機構

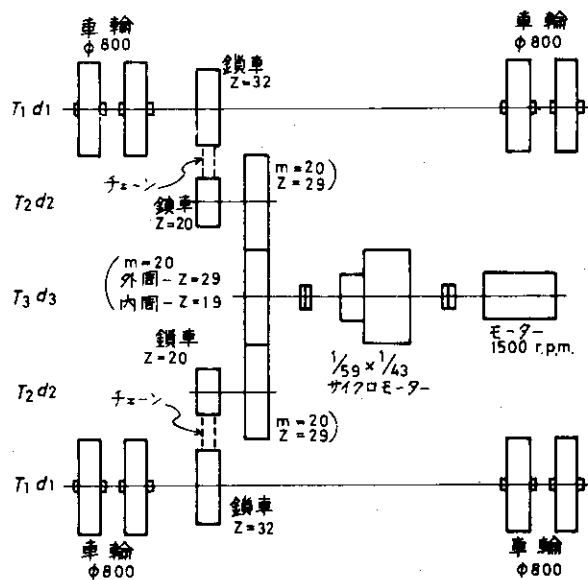


Fig. 3.14 駆動装置機構

Fig. 3.14のような駆動装置を、内周側 36m 半径に 2 台、外周側 55m 半径に 2 台、合計 4 台装備する。

この駆動装置によれば、旋回軌道半周を約 3 時間で旋回することが可能である。

(ii) 車輪の形状

エア-ベアリングの走行抵抗 F_1 と駆動台車の走行抵抗 F_2 の和から必要な駆動力が求められる。

床面とエア-ベアリングの摩擦係数 μ は、

$$\mu = 5 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$$

程度とみられるから、 F_1 は

$$F_1 \geq 1.75 \times 10^7 \times 4 \times 10^{-3} = 70 \times 10^3 \text{ kg}$$

となる。

駆動台車の車輪にウレタン系ゴムを使用すれば、ウレタン系ゴムの摩擦係数 $\mu = 0.4$ とすると、駆動台車 1 台当りの重量は、

$$W = \frac{F_1}{0.4 \times 4} = 438 \times 10^3 \text{ kg}$$

以上あれば良いことになる。

ローラ形状ウレタン系ゴムでは、撓み率 5% で、単位軸長当り 200kg/cm \sim 300kg/cm の負荷が許容できる。

Fig. 3.15のような車輪を使用すると、

$$\frac{438 \times 10^3}{30} = 1.46 \times 10^3 \text{ kg/cm}$$

となり、車輪の個数は、

$$n > \frac{1.46 \times 10^3}{200} = 7.3$$

したがって、この車輪 8 ケ使用すれば良い。

駆動台車の走行抵抗 F_2 は、ころがり抵抗 $\mu = 0.01$ とすると、

$$F_2 = 438 \times 10^3 \times 0.01 = 0.438 \times 10^3 \text{ kg}$$

したがって駆動台車 1 台が受ける走行抵抗 F は

$$\begin{aligned} F &= \frac{F_1}{4} + F_2 \\ &= \frac{70 \times 10^3}{4} + 0.438 \times 10^3 \\ &= 17.9 \times 10^3 \text{ kg} \end{aligned}$$

となる。

(iii) チェーン及び鎖車

チェーンの型式としては、一般的に用いられているローラチェーンを用いるものとする。又、使用頻度が少いことから、チェーンの破断強度に対し安全率 5 で選定するものとする。

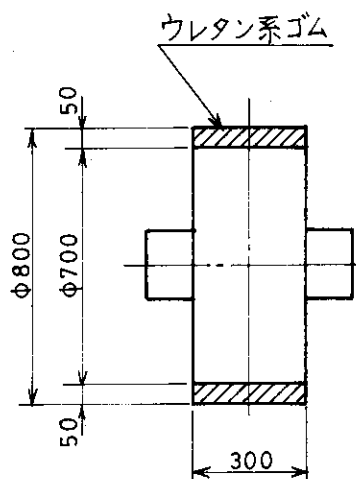


Fig. 3.15 車輪形状

チェーン番号200 (JIS規格) を使用すると、

破断強度 35400 (kg)

小鎖車ピッチ円径 405.92 (mm)

したがって、このチェーンが使用できるトルクは、次のようになる。

$$T = \frac{1}{5} \times 35.4 \times 10^3 \times \frac{0.40592}{2}$$

$$= 1.44 \times 10^3 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

実際に必要なトルクは、 $2.3 \times 10^3 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$ であるから、チェーンの列数は、

$$n > \frac{2.3 \times 10^3}{1.44 \times 10^3} = 1.6$$

となり、チェーン列数を2とする。

したがって、チェーン及び鎖車の仕様は、Table 3.11のようになる。

型式； ローラチェーン呼び番号200

列数； 2

Table 3.11 鎖車仕様

	ピッチ (mm)	ピッチ径 (mm)	歯数	外径
小鎖車	63.50	405.92	20	439
大鎖車	63.50	647.85	32	683

(V) 歯車及びモータ所要馬力

歯車にかかるトルクは、

$$T_2 = T_1 \times \frac{20}{32} \times \frac{1}{\eta} \quad \eta: \text{効率} 95\%$$

$$= 3.5 \times 10^3 \times \frac{30}{48} \times \frac{1}{0.95}$$

$$= 2.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

外周

$$T_3 = 2 \times 2.3 \times 10^3 \times \frac{1}{0.95}$$

$$= 4.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

内周

$$T_3 = 2 \times 2.3 \times \frac{19}{29} \times \frac{1}{0.95} \times 10^3$$

$$= 3.2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

“車輪による旋回台車”の項で述べた Lewis の式により算出した歯車の各仕様を Table

3.12, 13 にまとめた。

外 周

Table 3.12 外周駆動装置歯車のトルク, 接線力, 軸径

記号	T (t·m)	P (t)	d (mm)
2	2.3	7.9	120
3	4.8	8.3	150

内 周

Table 3.13 内周駆動装置歯車のトルク, 接線力, 軸径

記号	T (t·m)	P (t)	d (mm)
2	2.3	7.9	120
3	3.2	9.5	170

同様に, モータ所要トルクは,

外 周

$$T = 4800 \times \frac{1}{59} \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{0.75} = 2.52 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

内周周

$$T = 3200 \times \frac{1}{59} \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{0.75} = 1.68 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

所要モータ馬力は,

外 周

$$H = \frac{2.52 \times 1500}{974} = 3.9 \text{ kW}$$

内 周

$$H = \frac{1.68 \times 1500}{974} = 2.6 \text{ kW}$$

歯車の強度は, 同様に Table 3.14, 3.15 のようになる。

外 周

Table 3.14 外周駆動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯 幅 b (mm)	歯 数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	接 線 力 P (t)	伝達可能接線力 P' (t)
2	20	40	29	580	7.9	10.5
3	20	40	29	580	8.3	10.5

内 周

Table 3.15 内周駆動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯 幅 b (mm)	歯 数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	接 線 力 P (t)	伝達可能接線力 P' (t)
2	20	40	29	580	7.9	10.5
3	20	40	19	340	8.3	8.9

③ その他

(i) 遮蔽室の移動装置及びジャッキ

遮蔽室用の移動装置及びジャッキは、遮蔽室と炉モジュールの仕様が車輪による旋回台車の場合と全く同じなので、車輪による旋回台車の項で述べた仕様のものを使う。

(ii) 床面の検討

エア-ベアリングの性能に最も影響を及ぼすのは、床面である。ここでは、「金ゴテ仕上げのコンクリート仕上げ」以上の精度をもつ床面を考えている。又、床面の傾斜については、 $\frac{2}{1000} \sim \frac{5}{1000}$ 程度が一般的な許容値とみられる。

地耐力に関しては、エア-ベアリングのダイヤフラム内の空気圧が 3.5 kg/cm^2 であるから、 35 t/m^2 の分布荷重がかかるが、エア-ベアリングの有効面積の台車底面積に占める割合が50%程度なので、長期許容値耐力としては $20 \sim 25 \text{ t/m}^2$ 程度が必要と考えられる。

(5) まとめ

旋回台車の方式として、車輪方式とエア-ベアリング方式の2案を検討した。両者の優劣を次の項目について考える。

超重量物の移動実績

装置の規模

信頼性と保守

建屋に対する影響

① 超重量物の移動実績

車輪方式に関しては、近似の方法としてボールベアリングを使用した船の進水用駆動台車で30,000トン程度の船体を移動させる方法が実用化されている。

移動重量 : 25,000 ~ 30,000 トン

移動物床面積 : 800 ~ 1,000 m^2

重量支持法 : $\phi 90 \text{ mm}$ の球を移動物と床面の間に敷く。

支持面圧 : 300 kg/mm^2

重量、床面積とも旋回台車に近い仕様であり、旋回台車は面圧が約 50 kg/mm^2 と、低く押えてあるので、車輪方式による旋回台車は有望であるといえる。

エア-ベアリング方式では、米国ハワイスタジアムで6000 ~ 7000トンの観客席をスタジアムの用途に応じて、移動配置替えを行う設備として使用されており、我国でも圧力容器

など構造物の移動用に600トン程度の重量物を約90m移動している実績がある。

ただ、歴史が浅く、17000トンの移動実績はない。

② 装置の規模

Table 3.16 装置の規模

	車輪方式	エア-ベアリング方式
床面積	22m × 22m	24m × 41m
台車重量	2,800トン	4,200トン
駆動力	45 kW (TOTAL)	15 kW (TOTAL) (660 kW 圧縮機)
駆動方法	ピニオンラック	牽引車
旋回時間	1時間 (半周)	3時間 (-) → 半周

床面積、台車重量は、車輪方式の方が小型化でき有利である。

駆動力、駆動機構の剛性、機構の複雑さの点では、エア-ベアリングの方が有利である。

旋回時間については、駆動方式の選定によるので特に問題はないと考える。

装置の規模に関しての両方式の総合的な優劣はつけがたく、エア-ベアリングの能力アップと小型化、減速機器の今後の開発状況により詳細な検討がなされなければならない。

③ 信頼性

車輪方式については、在来技術の組合せで実現可能と思われる。

エア-ベアリング方式では、装置が大規模になった場合、騒音および多数のエア-ベアリングパッドに均一にエアを供給する制御方法などに未経験の問題点が生じる可能性がある。

④ 保守

小規模のメンテナンスは、車輪方式、エア-ベアリング方式のいずれにも必要であろう。大規模なメンテナンスとしては、車輪又はエア-ベアリングパッドの修理、交換が考えられる。

いずれの方式にしても台車下面の車輪又はエア-ベアリングパッドを故障した部分のみ取り出すのは困難であろう。

又、使用材質面でエア-ベアリングは、ウレタンゴムのベアリングパッドを使用しており、ゴムの劣化、床面との摩擦摩耗に起因するゴム寿命により定期交換が必要になる可能性はあるが、車輪方式では特に定期交換が必要となる材質を用いないですむ利点がある。

⑤ 建屋に対する影響

Table 3.17 建屋に対する影響

	車輪方式	エア-ベアリング方式
ピット深さ	6.5 m	5.5 m
地耐力	24 ton/m ²	17 ton/m ²
軌道精度	レール面	全床面

ピット深さについては、エア-ベアリング方式の方が浅くてすむ。又、地耐力については、台車床面積の広いエア-ベアリングの方が有利であるが、車輪方式にしても台車面積を広げることによって地耐力を上げることが可能である。

軌道床面の精度出しについては、車輪方式はレール面のみの平坦度に注意すれば良く、エア-ベアリング方式の全床面の平坦度を出すのに比較すれば容易であると考えられる。

以上5項目について比較検討したが、総合的に判断した場合、実績及び信頼性を考慮した装置の実現の可能性の高さを重要視し、車輪方式による旋回台車を採用する。

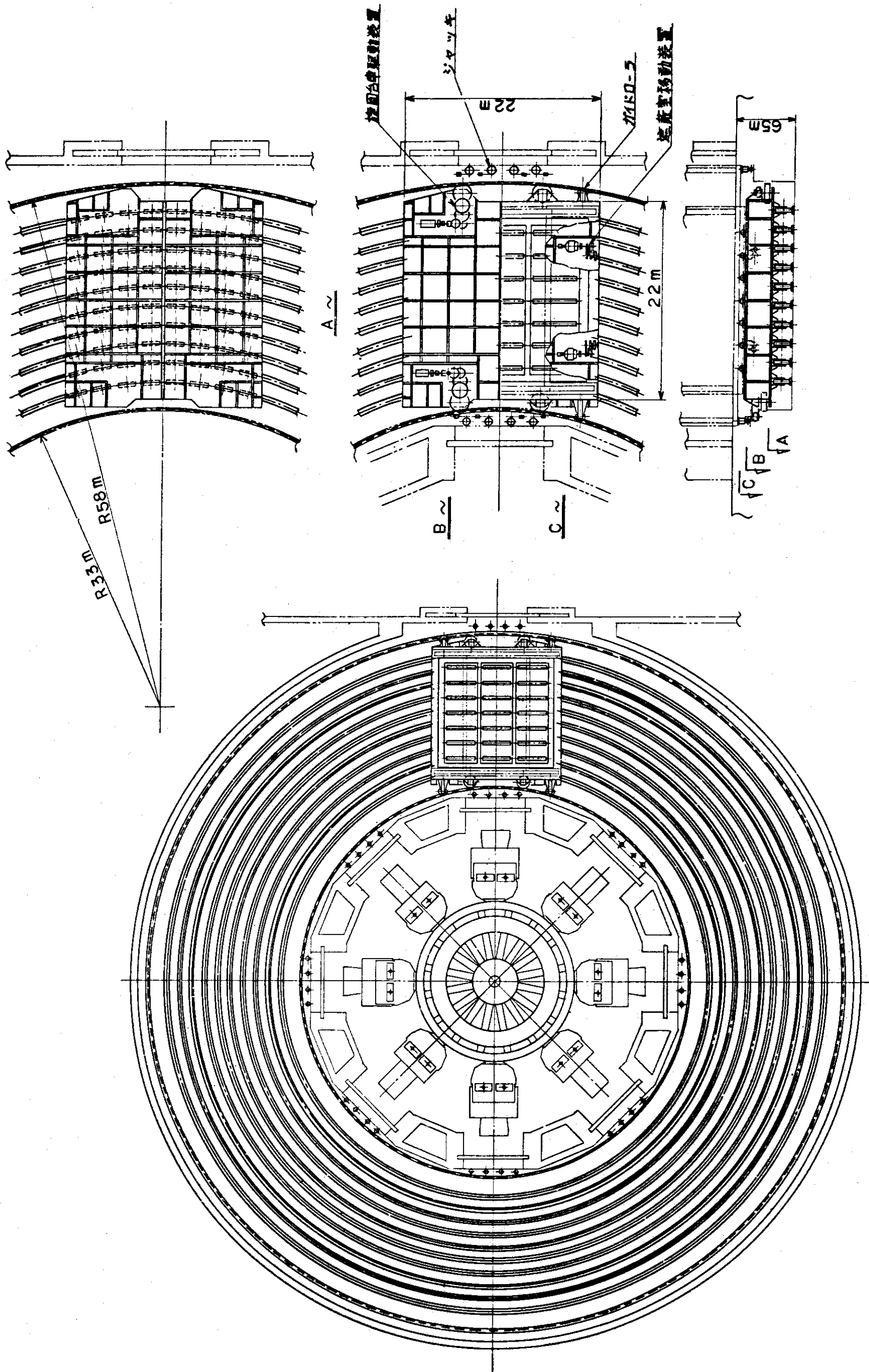


Fig. 3.16 車輪方式旋回台車

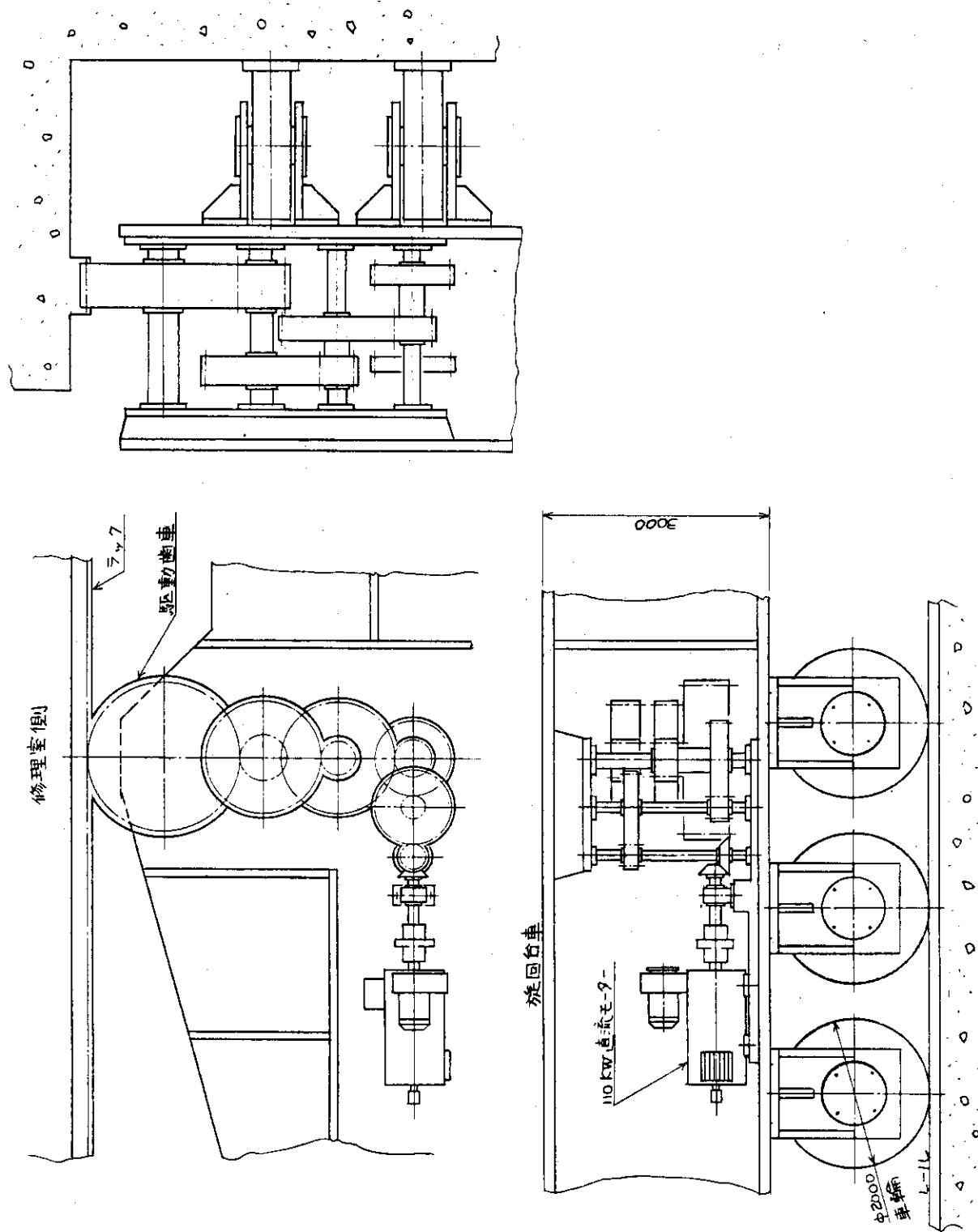


Fig. 3.17 外周旋回台車駆動装置

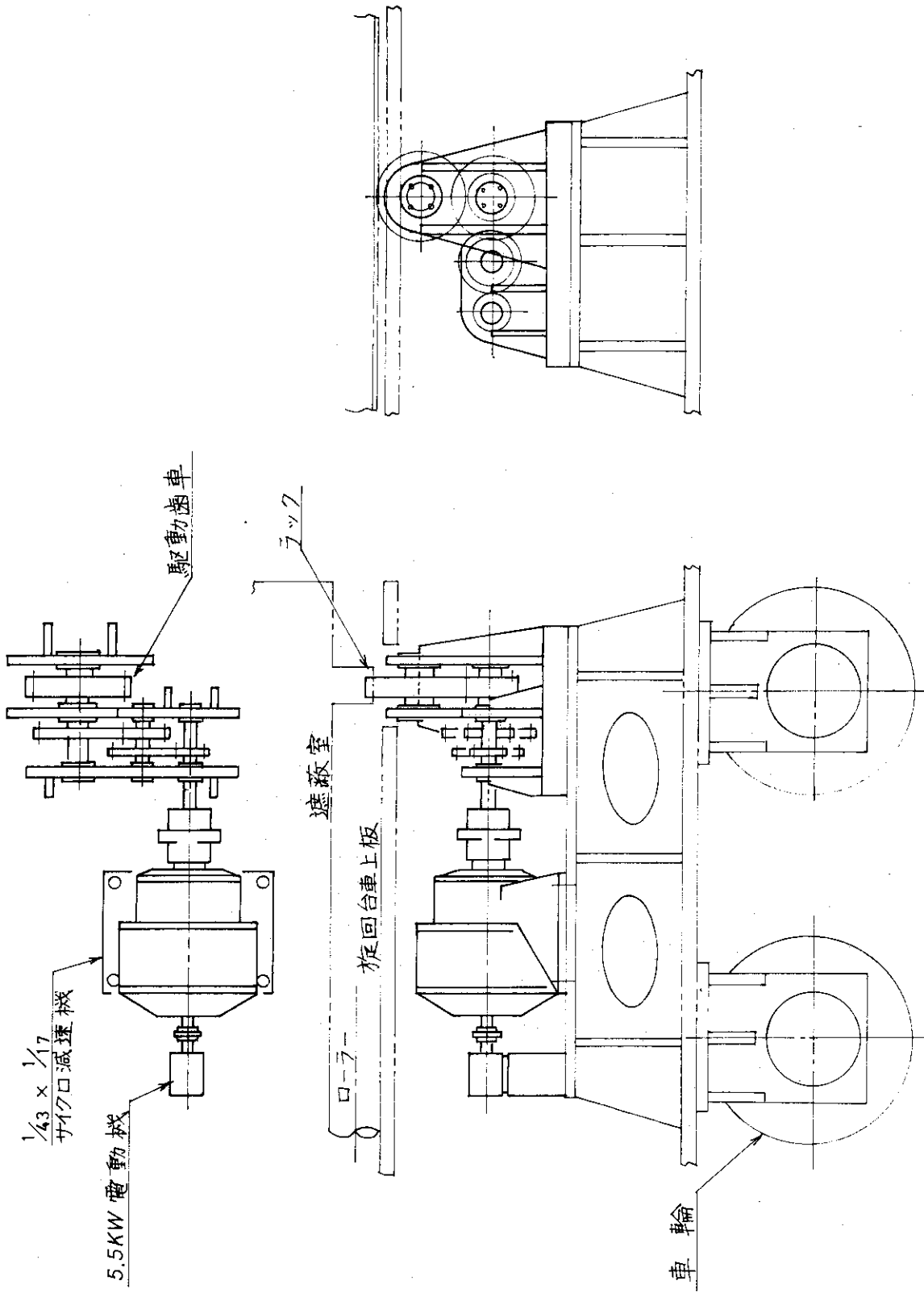


Fig. 3.18 遮蔽室移動装置

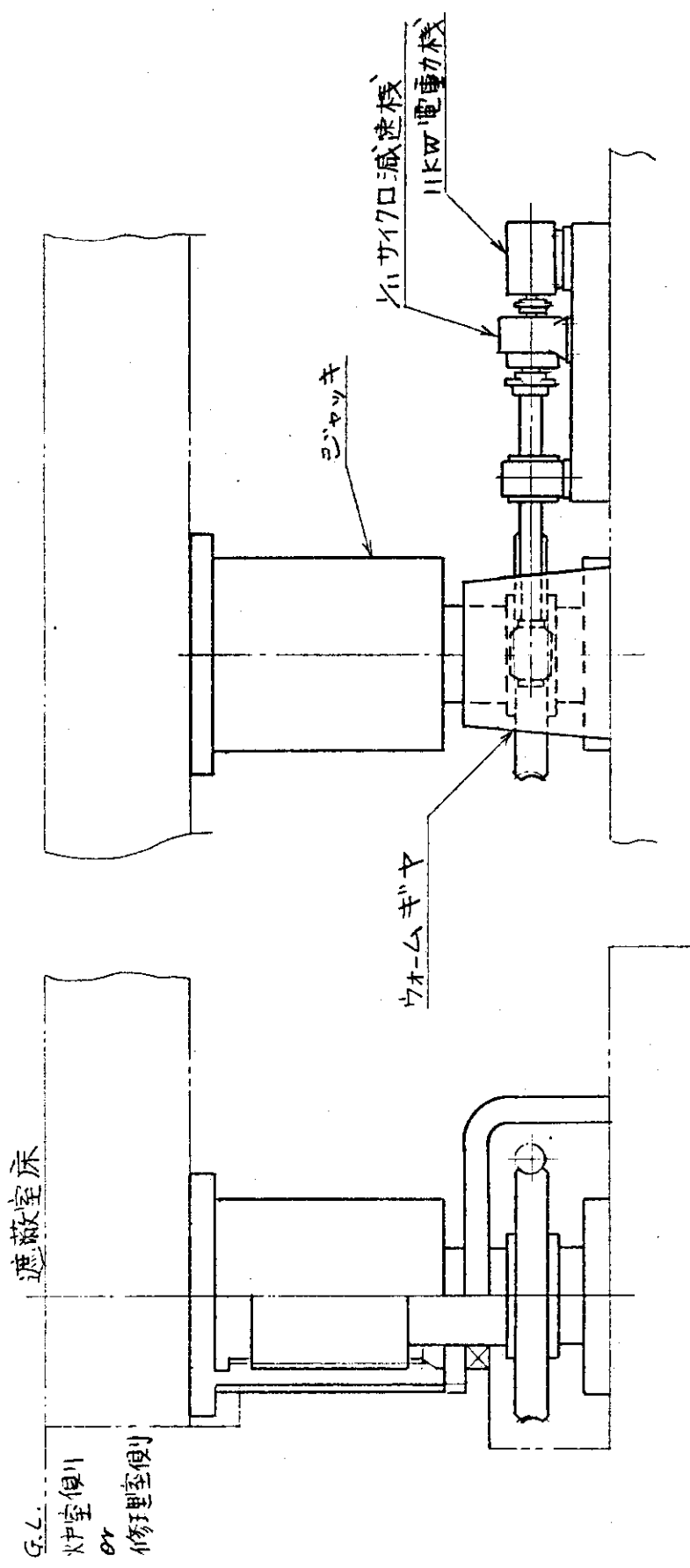


Fig. 3.19 ジ ャ ッ キ

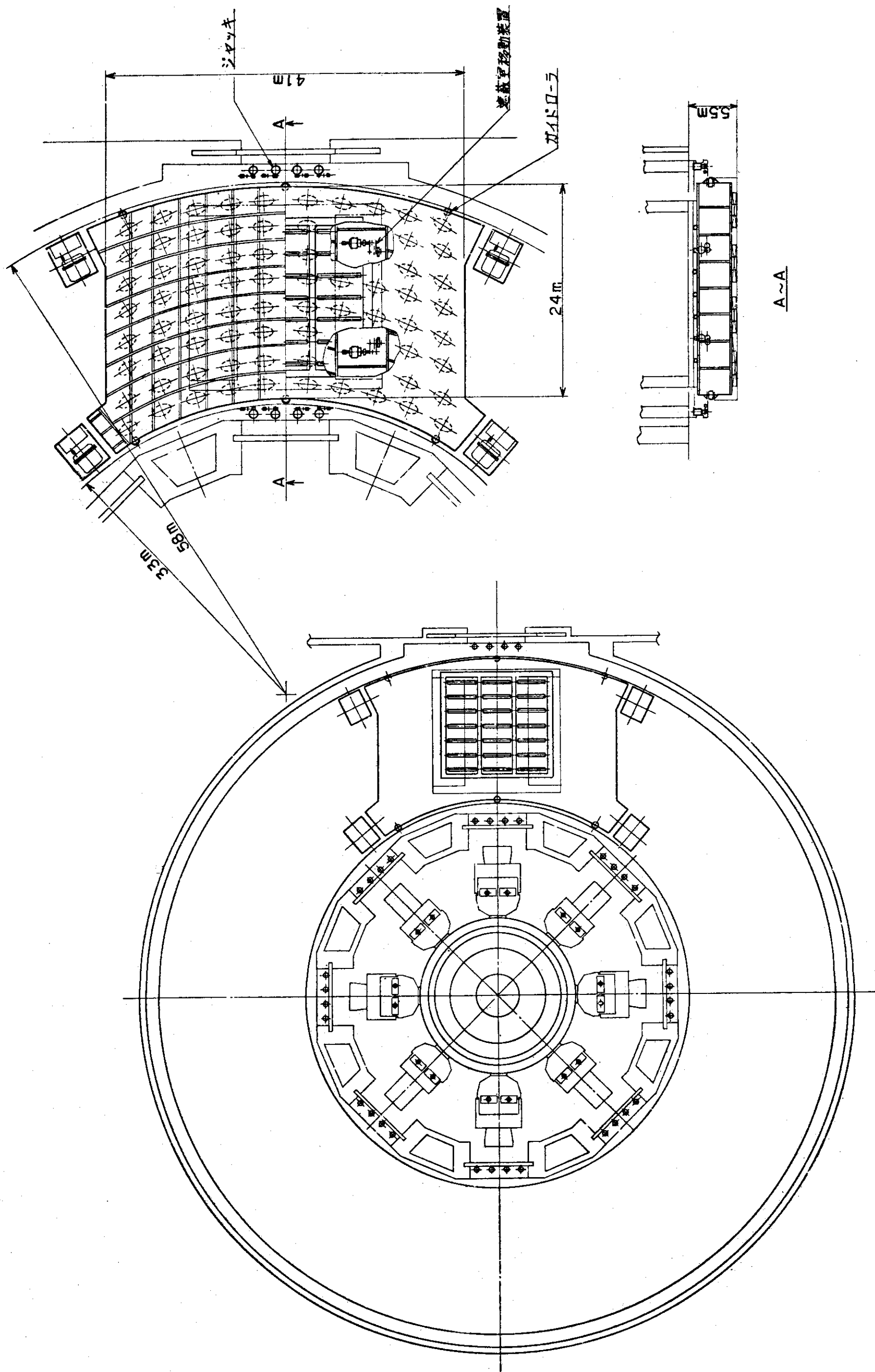


Fig. 3.20 エア-ベアリング方式の巡回台車

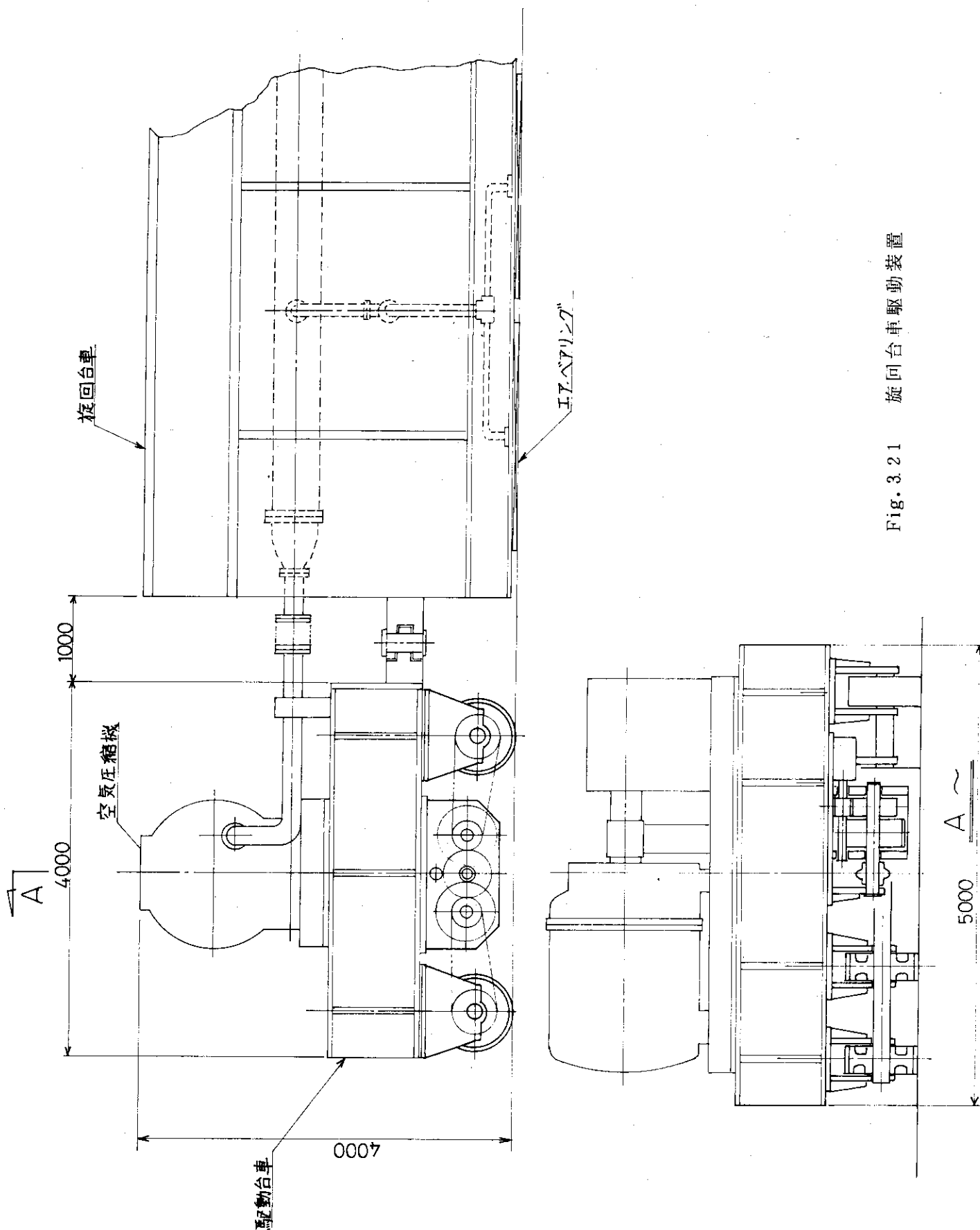


Fig. 3 21 旋回台車駆動装置

3.3 天井クレーン

(1) 炉室用天井旋回クレーン

このクレーンは、主としてポロイダルコイル円筒部や大径ポロイダルコイルの昇降及び水平移動用として設置され、その他の比較的小さな機器や検査装置等の搬送用としてなくてはならない設備である。Table 3.18 にクレーンの仕様を示す。

なお、炉ユニットの解体、組立の為、マニピュレータ付きのゴンドラを天井クレーンのガーダ部分に取り付けるものとする。

また、炉の運転中には強力な磁場が発生するので、その磁場をなるべく乱さないために、構造物の材質を非磁性のものにしなければならない。

もちろん、走行、横行、昇降装置の中で、非磁性材料を使えないものもあるが、大部分の重量を占めるガーダとトロリーについては、少なくとも非磁性材料であるステンレス鋼板を使用すべきである。

現在の段階では、透磁率うんぬんまでの細かい検討は行なわないものとする。

Table 3.18 仕様

つり上げ荷重	311 t (155.5 t × 2)				
定格荷重	主巻300 t (150 t × 2) 補巻50 t				
過荷重試験荷重	350 t				
揚程	主巻 37.5 m 補巻 38 m				
スパン	46 m				
運動	速度 (m/min)	電動機			ブレーキ
		出力 KW	回転数 rpm	定格% ED	
主巻	1.0	37 × 2	750	100	電磁ブレーキ スピトール
補巻	4.0	50	750	100	同上
横行	10	15	1000	40	電動油圧押し機 ブレーキ
走行	0.127 rpm (20)	22 × 4	1000	40	同上
電源	3相交流 400 V 50 Hz				
クレーン本体総重量	約500 t				

(2) 旋回室用天井クレーン

このクレーンは、旋回台車が走行する建屋を円周走行する。主に旋回台車のメンテナンス用として利用する。

Table 3.19 仕様

つり上げ荷重		102.6 t			
定格荷重		主巻 100t 補巻 50t			
過荷重試験荷重		定格荷重の1.25倍			
揚程		主巻 35 m 補巻 36 m			
スパン		25 m			
運動	速度 (m/min)	電動機			ブレーキ
		出力 KW	回転数 rpm	定格 % ED	
主巻	1.2	33	1000	100	電磁ブレーキ スピトール
補巻	4.0	50	750	100	同上
横行	10	3.7	1000	40	電動油圧押し上機 ブレーキ
走行	20	DC 7.5 × 2	1150	40	同上
電源		3相交流 400 V 50 Hz			
クレーン本体総重量		約 150 t			

(3) 修理室用天井クレーン

修理室は各小部屋に分かれており、それぞれの用途に応じた定格荷重 50 t 用、100 t 用、300 t 用、500 t 用の天井クレーンが設けられている。

Table 3.20 は、これらの中で最も大きな 500 t 用の仕様についてであり、トロイダルコイル 1 個分 (約 450 t) を吊り上げ下げする場合を想定している。

この程度の定格荷重の天井クレーンは、国内においても実績があり、特に問題はない。

Table 3.20 仕 様

つり上げ荷重	520t (260t × 2)				
定 格 荷 重	550t(250t × 2)補巻50t				
過荷重試験荷重	550t				
揚 程	主巻 37.5m 補巻 38m				
ス パ ン	22.5m				
運 動	速 度 (m/min)	電 動 機			ブ レ ー キ
		出力 kW	回転数 (rpm)	定格 % ED	
主 巻	0.8	50 × 2	750	100	電磁ブレーキ スピトロール
補 巻	4.0	50	750	100	同 上
横 行	10	15	1000	40	電動油圧押し機 ブレーキ
走 行	20	11 × 4	1000	40	同 上
電 源	3相交流 400V 50Hz				
クレーン本体総荷重	約 400t				

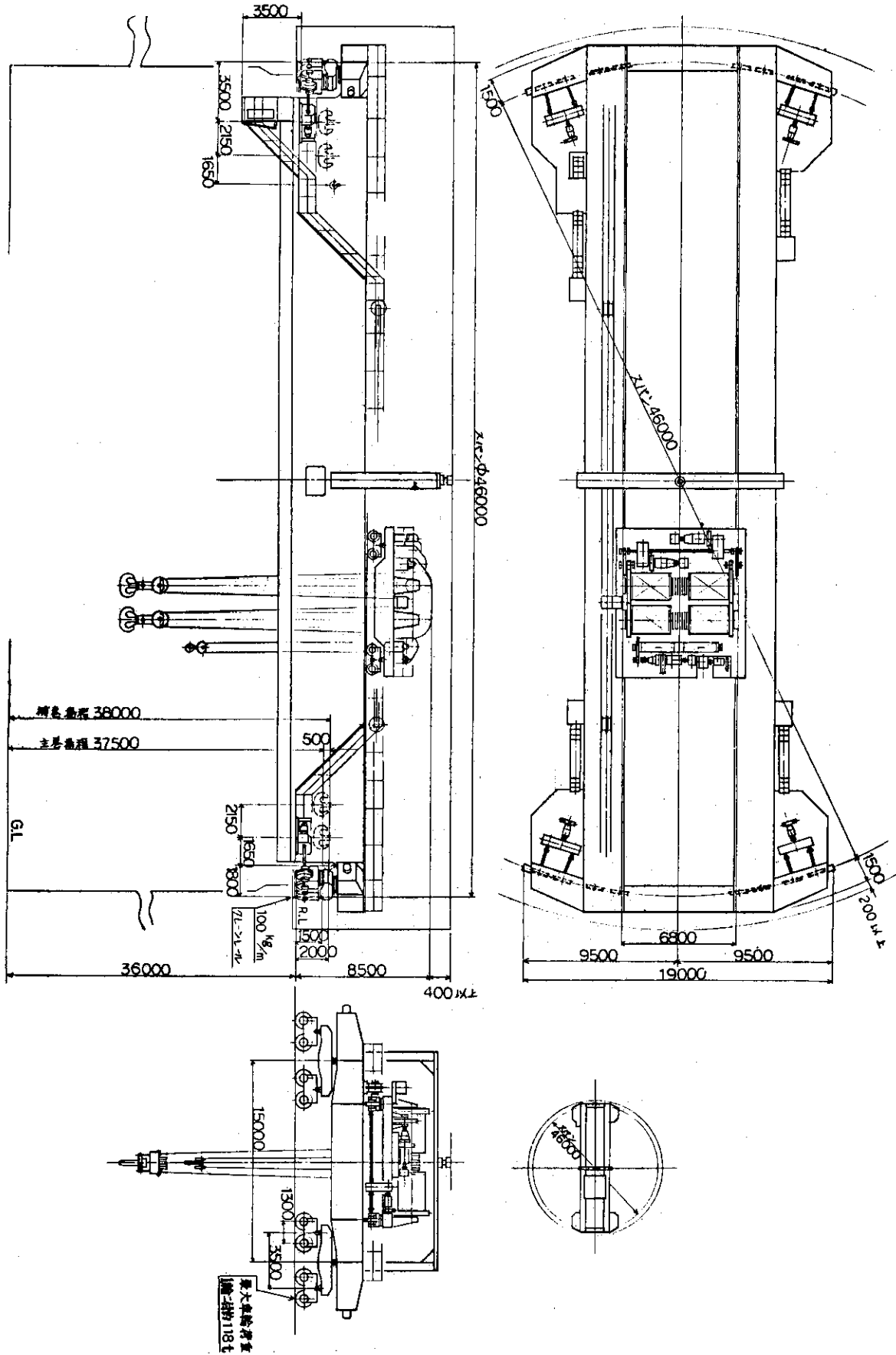


Fig. 3.22 炉室用天井旋回クレーン

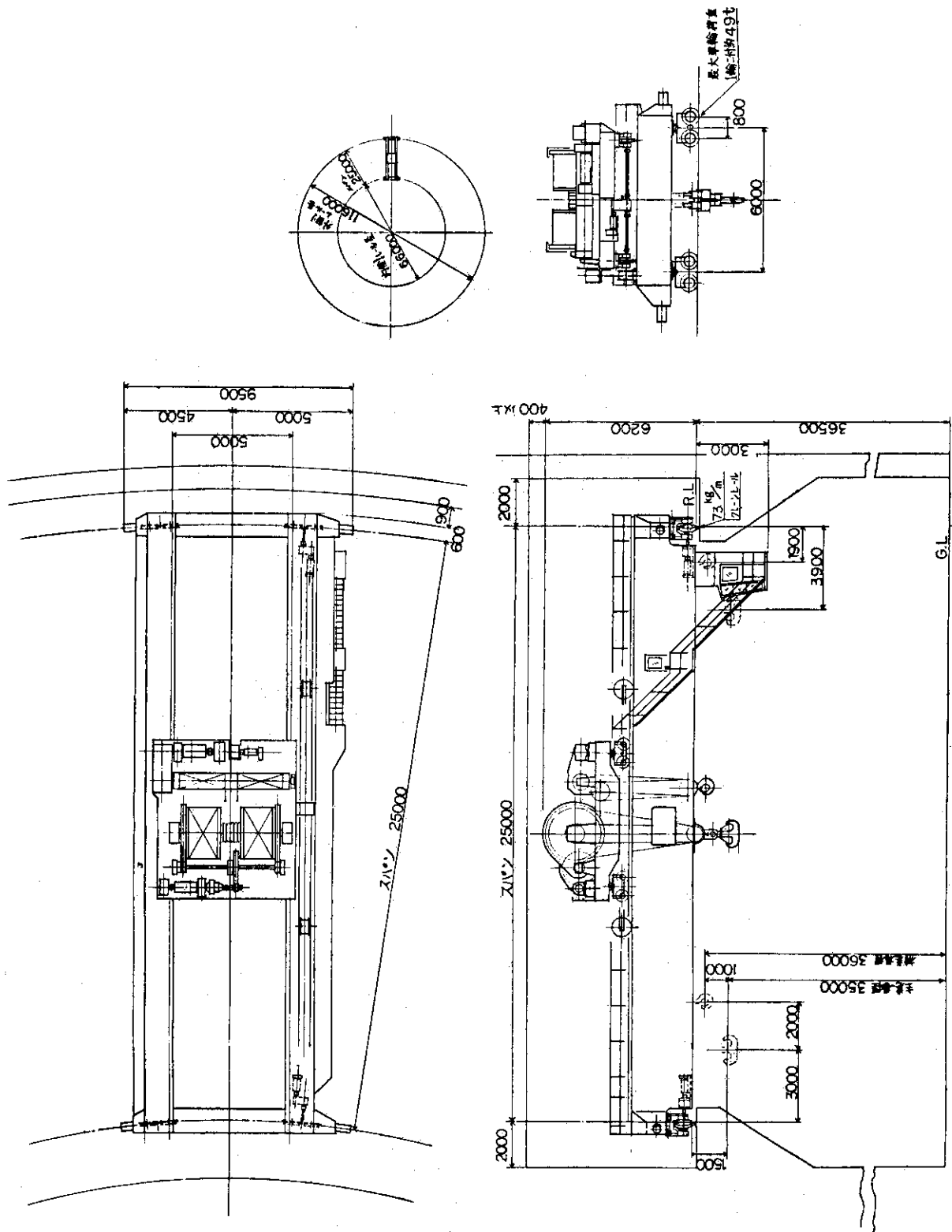


Fig. 3.23 旋回室用天井クレーン

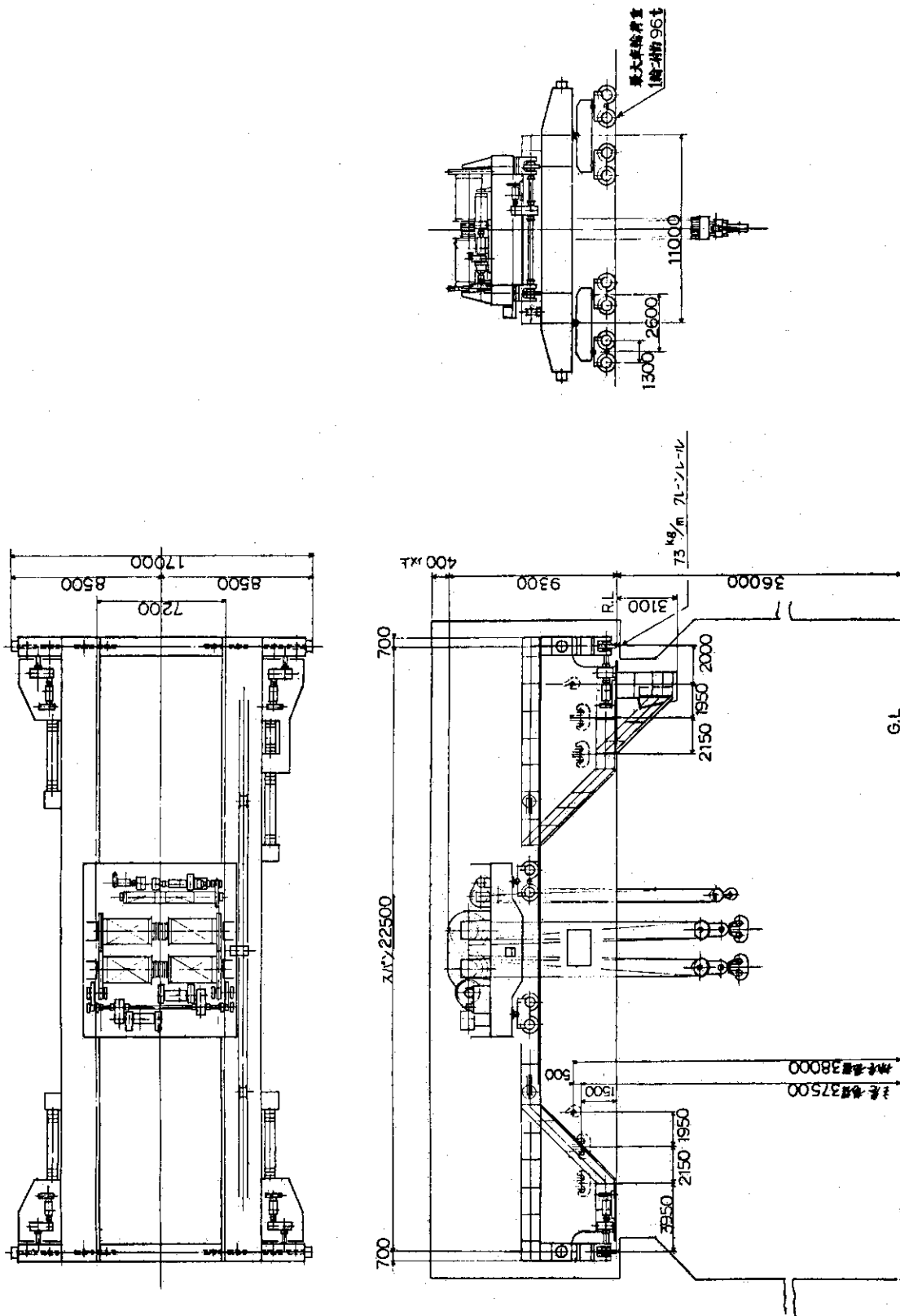


Fig. 3.24 修理室用天井クレーン

3.4 遠隔操作装置

1) 概 要

炉モジュールを取り出すには、数多くの機械的結合部の解除及び重量物の搬送作業を行わなければならない。組立てにおいても、結合、重量物の搬送及び検査等の作業を行わなければならない。これらは放射能下の作業であり、人力による作業が不可能かあるいは極度に制限されるであろう。又、空間的にも極く限られた範囲で作業を行わなければならない。したがって、作業装置は遠隔操作装置とならざるをえない。

現在、炉の詳細が明確でなく遠隔操作装置のための仕様を割り出すのは困難である。ここでは、基本的な作業における遠隔操作装置についての概念を述べるに留める。

2) 小型作業車

大型作業車に依らないてまごました作業をするため小型作業車が必要である。作業としては次の様なものがあげられる。

- 1) 炉内清掃
- 2) 炉室清掃
- 3) 軽量物の搬送
- 4) 各種ボルトの着脱
- 5) パイプ及び電気系統の結合及び解除
- 6) そ の 他

小型車の例として「MF-2」¹⁾及び「MF-3」¹⁾をFig. 3.25とFig. 3.26に示す。MF-2は Gesellschaft für kernforschung mbH. の概念設計で、Dr. Ing. W. Ständer of the Polytechnic Institute により開発された。MF-3は、Gesellschaft für kernforschung mbH., Karlsruhe, FRG. Primarilyにより開発中である。(1976年現在)

MF-2は、放射性物質や放射能が高レベルの場所などで使用される。つまり、人間による作業が極度に制限される場合や不可能な場合に使用される。3つのアームは、Total 6自由度を備え、又、パワーアーム先端のアタッチメントには次の様なものが使用可能である。

(イ) Seven special tongs

grip hook, small parallel-jaw tongs, multipurpose tongs with six different functions, pipe tongs, tongs for inside grab, grab for 200-litre drums of radioactive waste, and pin-up jaws for large parallel-jaw tongs to permit gripping bulky objects.

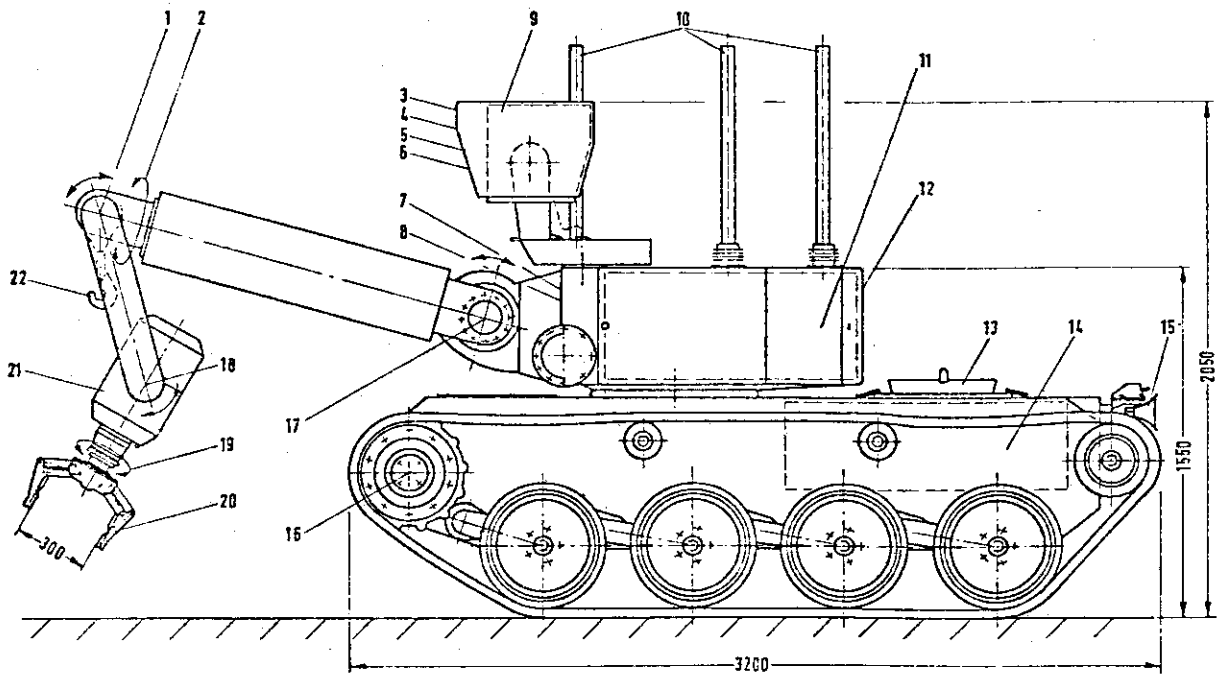
(ロ) Four mechanical tools.

parallel-jaw screw wrench, tool carrier for socket wrench, cutting hook, and plate shears.

(ハ) Four electric tools

impact screw driver, drilling tool, tenon saw, and hammer.

又、FM-2は、次のような作業を行うことができる。



The MF2 manipulator vehicle—details: 1. elbow joint; 2. arm rotation; 3. mono television camera; 4. searchlights; 5. stereo microphones; 6. stereo television cameras; 7. gamma dose-rate meter; 8. temperature sensor; 9. swivel-tilting head; 10. aerials; 11. transmitters and receivers; 12. swivel turret; 13. sample collecting vessel; 14. lead batteries; 15. automatic trailer coupling; 16. driving wheel with drive motor and gear at rear; 17. shoulder joint; 18. hand joint; 19. hand rotation; 20. large parallel-jaw tongs; 21. SM5-D power manipulator; 22. load hook.

Fig. 3.25 MF-2

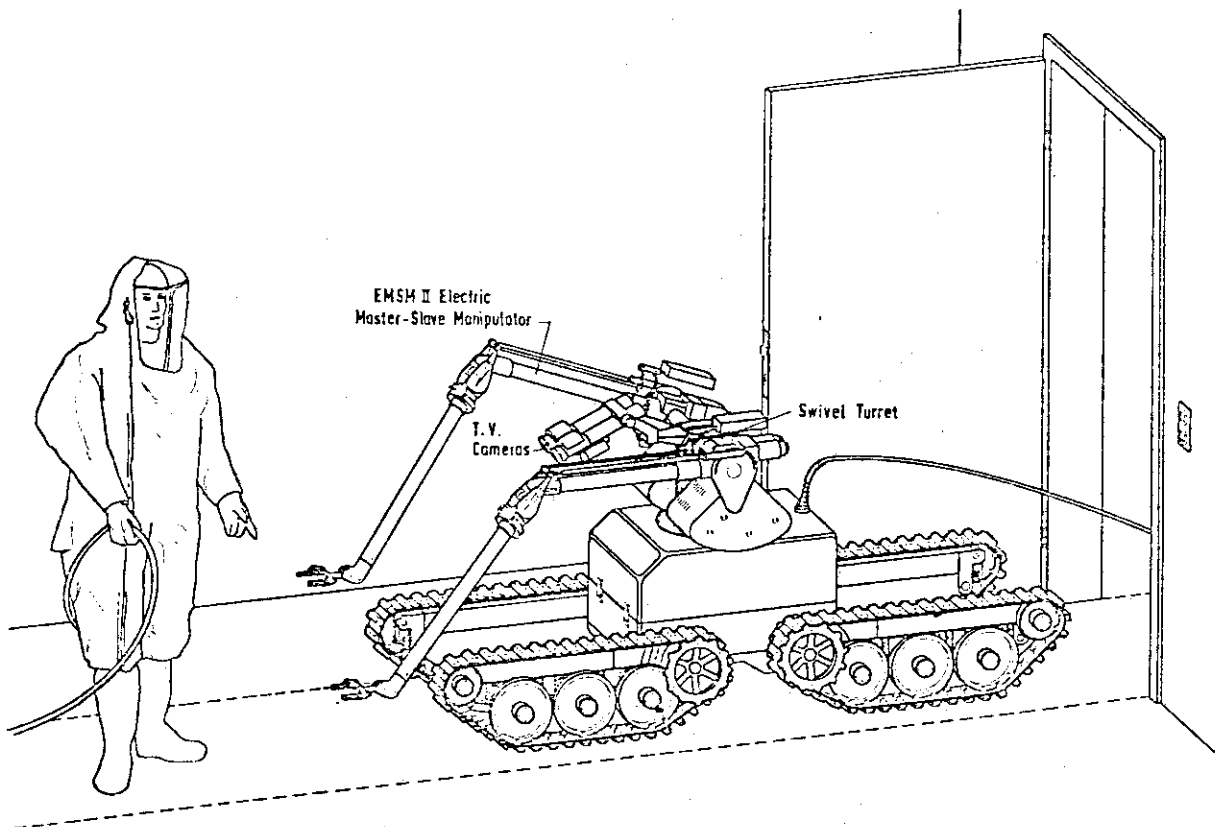


Fig. 3.26 The MF3-E manipulator vehicle

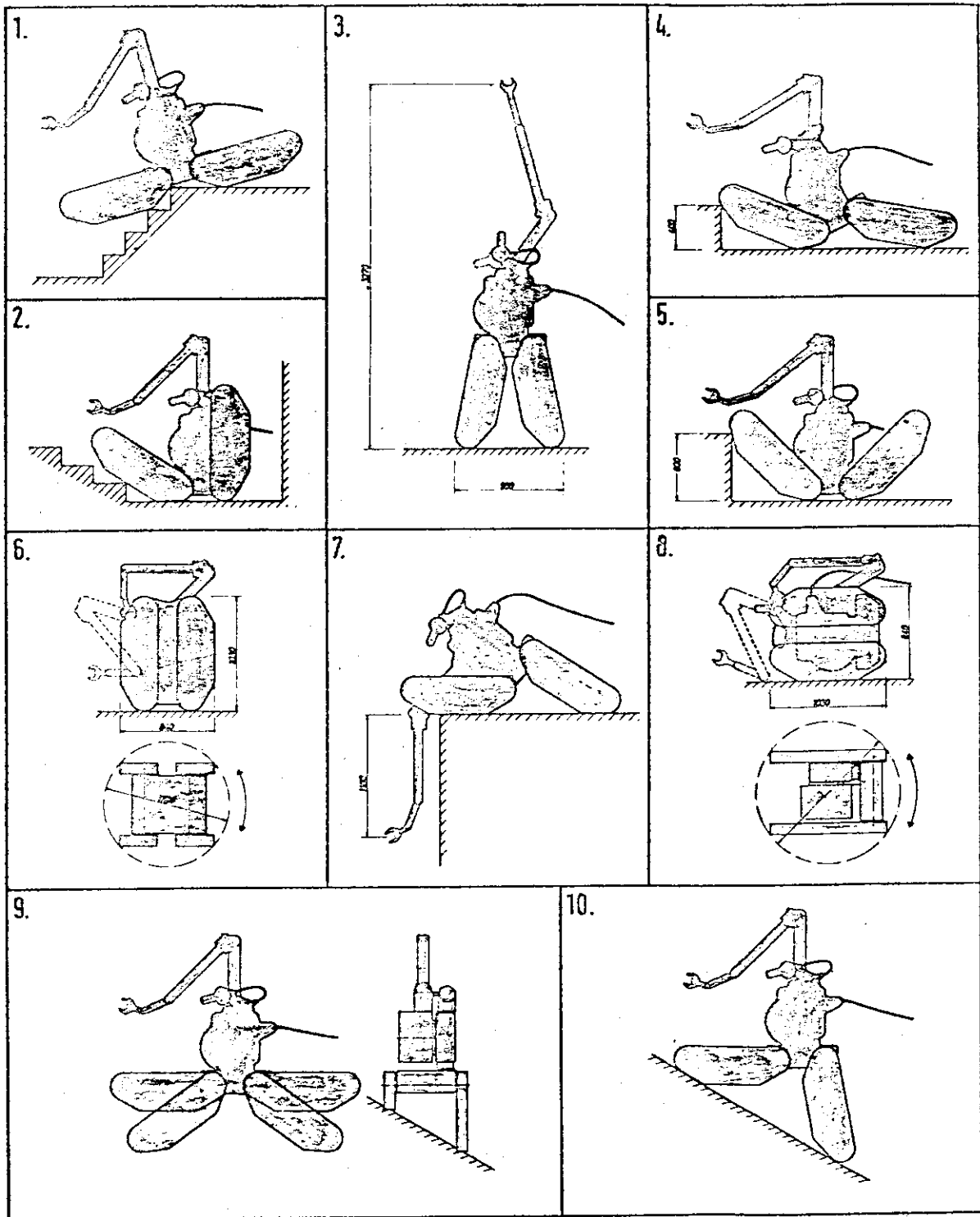


Fig. 3.27 MF-3 の動作

The variable chassis geometry of the MF3 vehicle: 1. When driving downward, no dumping on a stair; 2. situation at a stair landing; 3. increasing the range in the upward direction; 4. climbing high steps; 5. climbing very high steps with adjustment of the chassis members; 6. shortest length; 7. increasing the range below the standing level; 8. lowest height; 9. transverse inclination balanced out; 10. longitudinal inclination balanced out.

- (イ) 放射性物質のサルベージング及びパッケージング
- (ロ) 壁シールの為のレンガ積み
- (ハ) クレーンの玉掛け作業
- (ニ) 物の移動
- (ホ) tool を使用しての結合及び解除作業
- (ヘ) 電気系統及び配管の結合及び解除
- (ト) 各種測定及び検査
- (チ) その他

MF-3は、室内用に開発されたものであるがもちろん戸外でも使用可能である。車台とマニピュレータは別々に設計されており注目に値するのは車台にある。この動作については Fig. 3.27 に示す。又、車台とマニピュレータは、1人で操作可能である。

3) 大型作業車

小型作業車は炉体の下面に相当する区域、及び、ゴンドラは炉体の上面に相当する区域での作業に使用され、又扱う重量は比較的軽量である。

したがって、小型作業車とゴンドラの間区域で、しかもクレーンで作業できないような区域、例えば炉体下部に相当する区域で重量物を取扱うような作業に従事するための大型車が必要である。

作業内容としては、次の様なものがある。

- (イ) 遮蔽壁ボルト着脱
- (ロ) 遮蔽ブロック着脱
- (ハ) ポロイダルコイル昇降用床面ピットのための床板搬送
- (ニ) レール保護板搬送
- (ホ) 引出用台車フレーム搬送
- (ヘ) 配管及び電気系統の結合及び解除
- (ト) その他

このような種々の作業に従事するため、より多自由度のマニピュレータが要求される。

Fig. 3.28 に示すように、UWMAK-Iにおいて炉心部に接近できるような作業車の概念図²⁾が考案されているが、本炉においてもこれに近い大型の作業車が必要になるであろう。

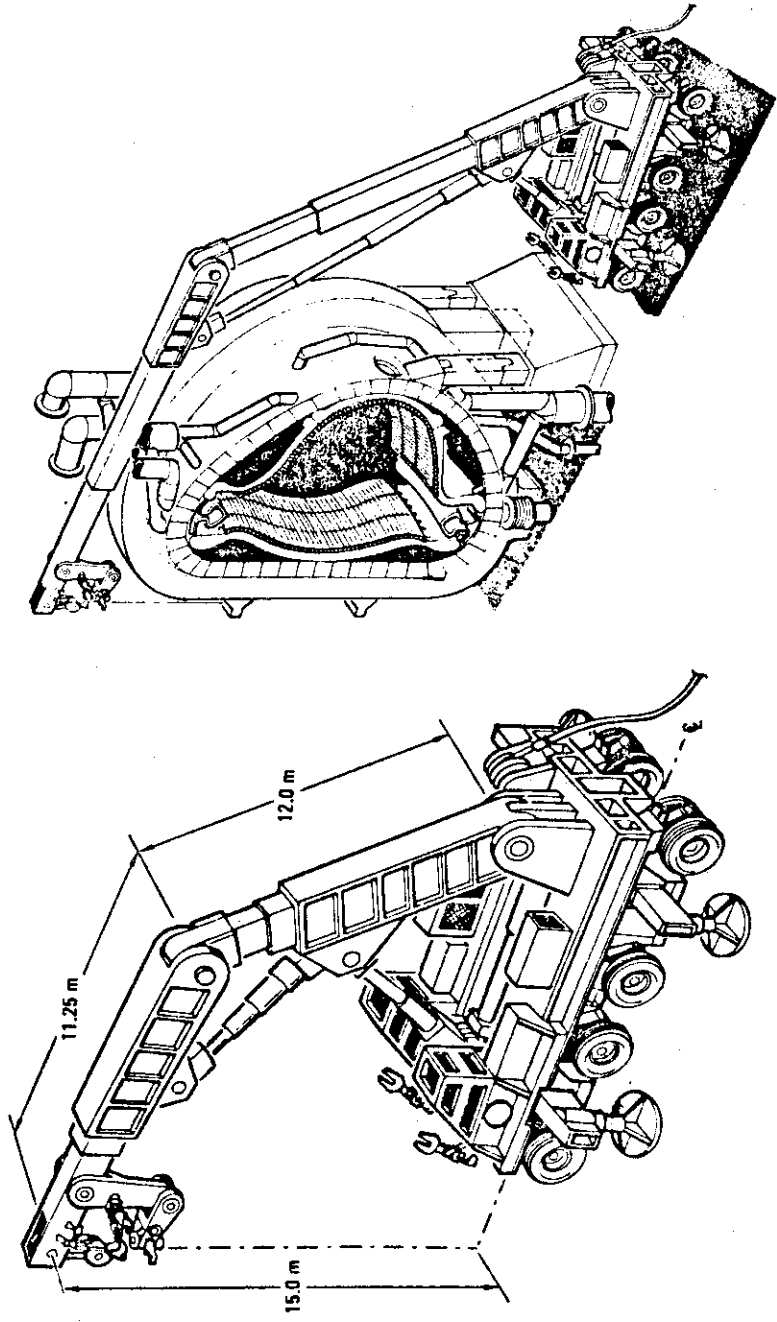


Fig. 3.28 大型作業車概念図

4) ゴンドラ

作業車による作業が困難な個所、つまり主に炉体の上部に相当する個所での作業を行うためゴンドラが必要と考えられる。ゴンドラは、天井クレーンのガーダに取り付けられる。作業としては次の様なものがあげられる。

- (イ) 冷却配管、電気系統の結合及び解除
- (ロ) 遮蔽壁ボルトの着脱
- (ハ) 遮蔽ブロックの着脱
- (ニ) 軽量物の搬送及び取り付け解体
- (ホ) その他

参考に Fig. 3.29 のものを示す。これは、Gesellschaft für kernforschung in corporation と Blocker-Motor KG. により開発された。この EMSM-1¹⁾ は、検査、保守及び修理の際、人の立入りが制限される時使用される。9つの動作が可能であり先端のアタッチメントは、フレキシビリティをもたすため種々の部品と交換使用が可能である。

又、Fig. 3.30 に示すように、4つの機能を備えた天井に取り付けることも可能である。4つの機能とは、下に示すようなものである。

1. 複数のテレスコーピング・チューブのホイスト
2. 回転機構
3. クレーントロリー
4. トラベリング・ブリッジ

5) 検査装置

炉の検査としては、主としてシール部の検査となろう。この検査法としては、3.6「溶接部の検査法」の項で詳しく述べる。洩れ検査の対象となるのは、

- (イ) 遮蔽壁シールの溶接部
- (ロ) 冷却配管の結合部
- (ハ) NBI 遮蔽壁の結合部
- (ニ) マグネット真空容器の結合部
- (ホ) その他

というようなものがあげられ、どれも永久的にシール部の洩れに対する信頼性が保持されなければならない。したがって、検査装置においてはその信頼性が完全でなければならない。

炉室内は放射能下であり、検査装置は当然自動遠隔操作となるであろう。検査装置は、車台に乗せられその位置決め後、車台に装備されたマニピュレータにより作業がなされるか、あるいは、別の作業車に備えられたマニピュレータにより作業が行なわれるようになるであろう。どちらにしても、検査は炉の保守上きわめて重要な位置をしめ、以後開発改良されなければならない要素が大である。早急に試作機を開発し改良を重ねていく必要がある。

6) TVシステム

下に記す様な作業のためのTVシステムが必要である。

- (イ) マニピュレータによる作業
- (ロ) クレーンによる作業

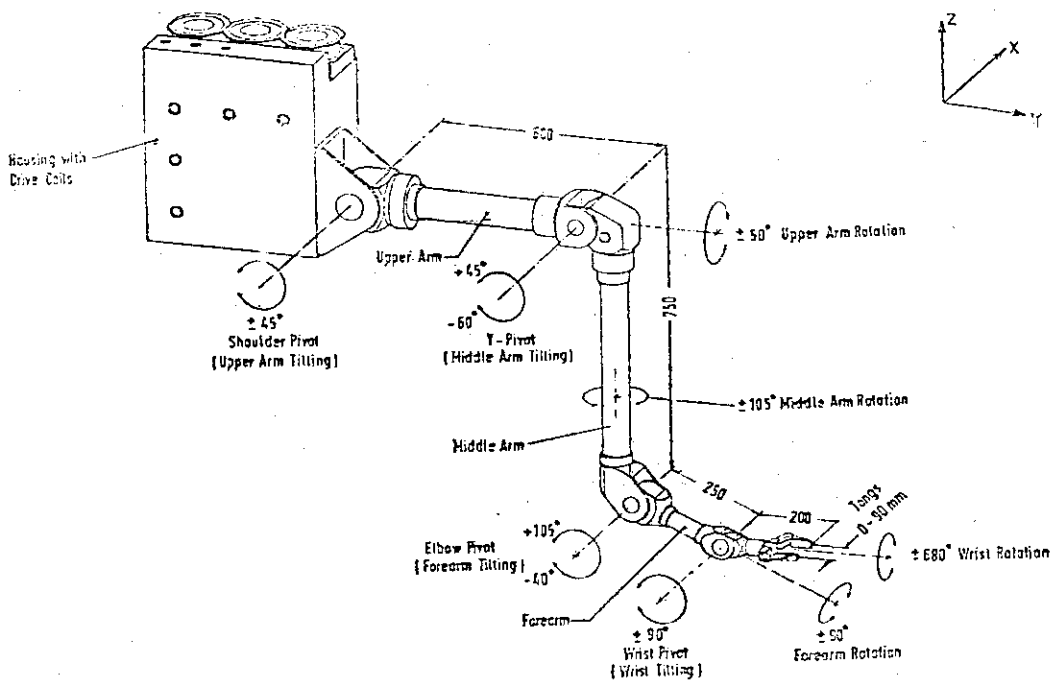


Fig. 3.29 The EMSM-I slave arm

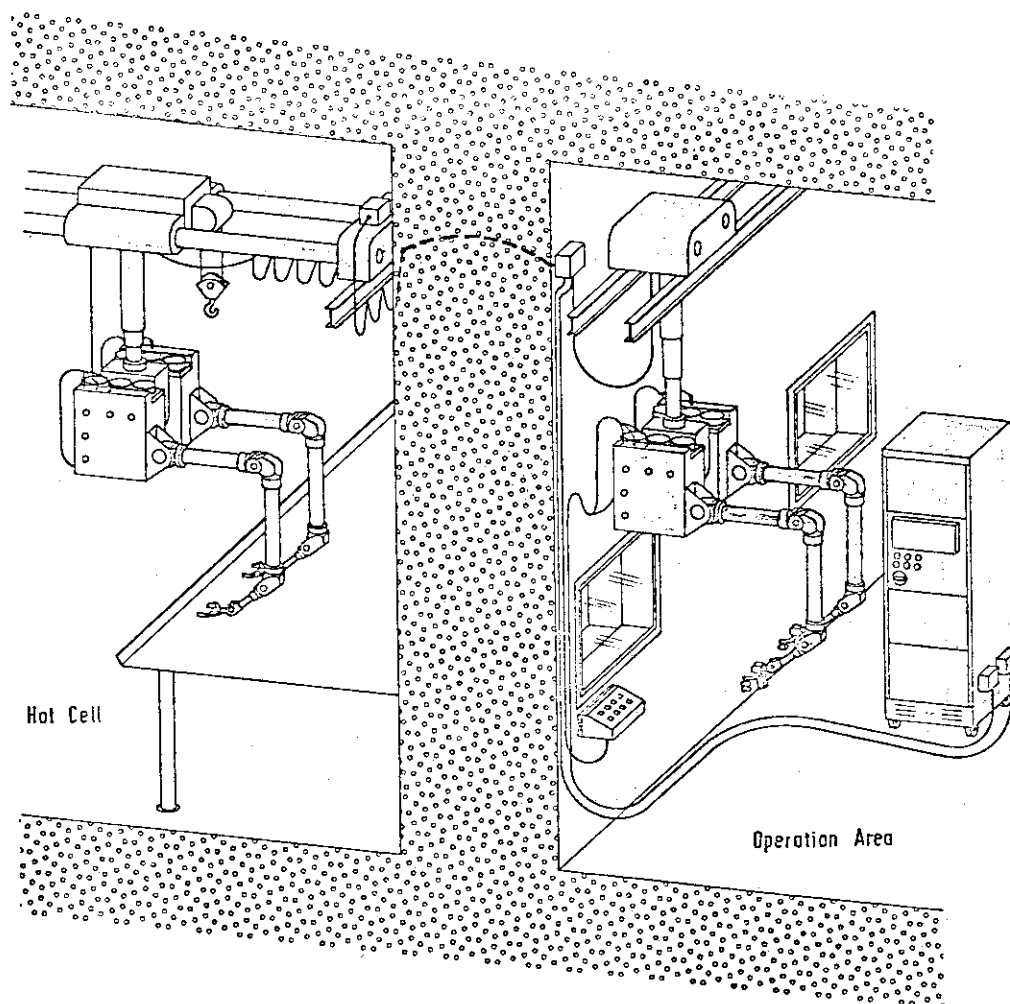


Fig. 3.30 The EMSM-I version for hot cells.

(ハ) 自動溶接切断作業

(ニ) 修理及び検査

(ホ) その他

炉室内の作業は、ほとんど遠隔操作なので作業の監視はTVシステムになるであろう。作業箇所や作業状況を正確に映し出すためTVカメラは、その作業に応じて体勢を変えることのできる機能を備えなければならない。又、TVカメラに準じてサーチライトのような光源も必要になってくるであろう。

7) その他の遠隔操作装置

① 天井走行クレーン

円筒ボロイダルコイル、大径ボロイダルコイル及びその他の重量物の搬送用として天井走行クレーンが装備される。詳しくは、3.3「天井走行クレーン」の項で述べる。

② 遮蔽扉開閉装置

遮蔽扉の開閉用として、ウィンチ等が装備される。詳しくは、5.3「遮蔽扉の設計」の項で述べる。

③ 自動溶接機

遮蔽壁シール部のための装置と、配管のための装置とがあるが、3.5「自動溶接機」の項で詳しく述べる。

④ 引出用台車

これは、炉モジュールの移動及び位置決めのための台車である。その駆動装置は遠隔操作となる。詳しくは、3.1「引出用台車」の項で述べる。

⑤ 旋回台車

これは、炉室外周に設けられた旋回軌道上を旋回する台車である。これには、台車駆動装置及びその他の目的のための駆動装置が装備されるが、すべて遠隔操作される。詳しくは3.2「旋回用台車」の項で述べる。

⑥ その他

ここで記載した遠隔操作装置以外に、特殊な目的のための作業車やマニピュレータ等が必要になってくる可能性がある。これらの装置は、ほとんどすべての遠隔操作される機能を備えなければならないであろう。

8) まとめ

各自動遠隔操作装置とその作業内容についてまとめるとTable 3.21のようになる。

Table 3.21 自動遠隔操作装置とその作業

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
天井クレーン	○	○									
ゴンドラ		○	○	○	○						
大型作業車	○	○	○	○	○						
小型作業車		○	○	○	○						
検査装置						○					
TVシステム						○	○				
自動溶接機								○			
遮蔽扉開閉装置									○		
引出用台車										○	
旋回台車											○

- | | |
|----------------------|-----------------|
| 1. 重量物搬送 | 7. 監視 |
| 2. 軽量物搬送 | 8. 遮蔽壁その他シール部溶接 |
| 3. 遮蔽ブロック着脱 | 9. 遮蔽扉開閉 |
| 4. 各種ボルト着脱 | 10. 炉モジュール搬送 |
| 5. 冷却配管及び電気系統の結合及び解除 | 11. 炉室と外部間での物移動 |
| 6. 検査 | |

表に示すように、ある作業専用の装置から多種類の作業に及ぶ装置まで数多くの自動遠隔操作装置が必要である。どれも炉の保守上きわめて重要であり、その信頼性を確保しなければならない装置ばかりである。

ここでは述べてないが、円筒ポロイダルコイルとトロイダルコイルの真空容器シール部等の炉特有の問題があり、それを取り扱うための特殊な作業車又はマニピュレータが必要になってくるであろう。こういった問題も含め、今後、炉の設計を進めていくのと並行して、自動遠隔操作装置の開発改良を進めていく必要がある。

なお、Fig. 3.31に解体作業概念図を示す。ここでは、大径ポロイダルコイルを吊った状態、大型作業車が炉室内に入って作業している状態、ゴンドラが作業している状態などをあらわしている。

参考文献

- 1) ADVANCES IN REMOTE MANIPULATION
PROCEEDING OF 24th CONFERENCE ON REMOTE SYSTEMS

TECHNOLOGY, 1976

2) REMOTE MAINTENANCE CONSIDERATIONS FOR FUSION REACTORS

PROCEEDING OF 25th CONFERENCE ON REMOTE SYSTEMS TECHNOLOGY, 1977

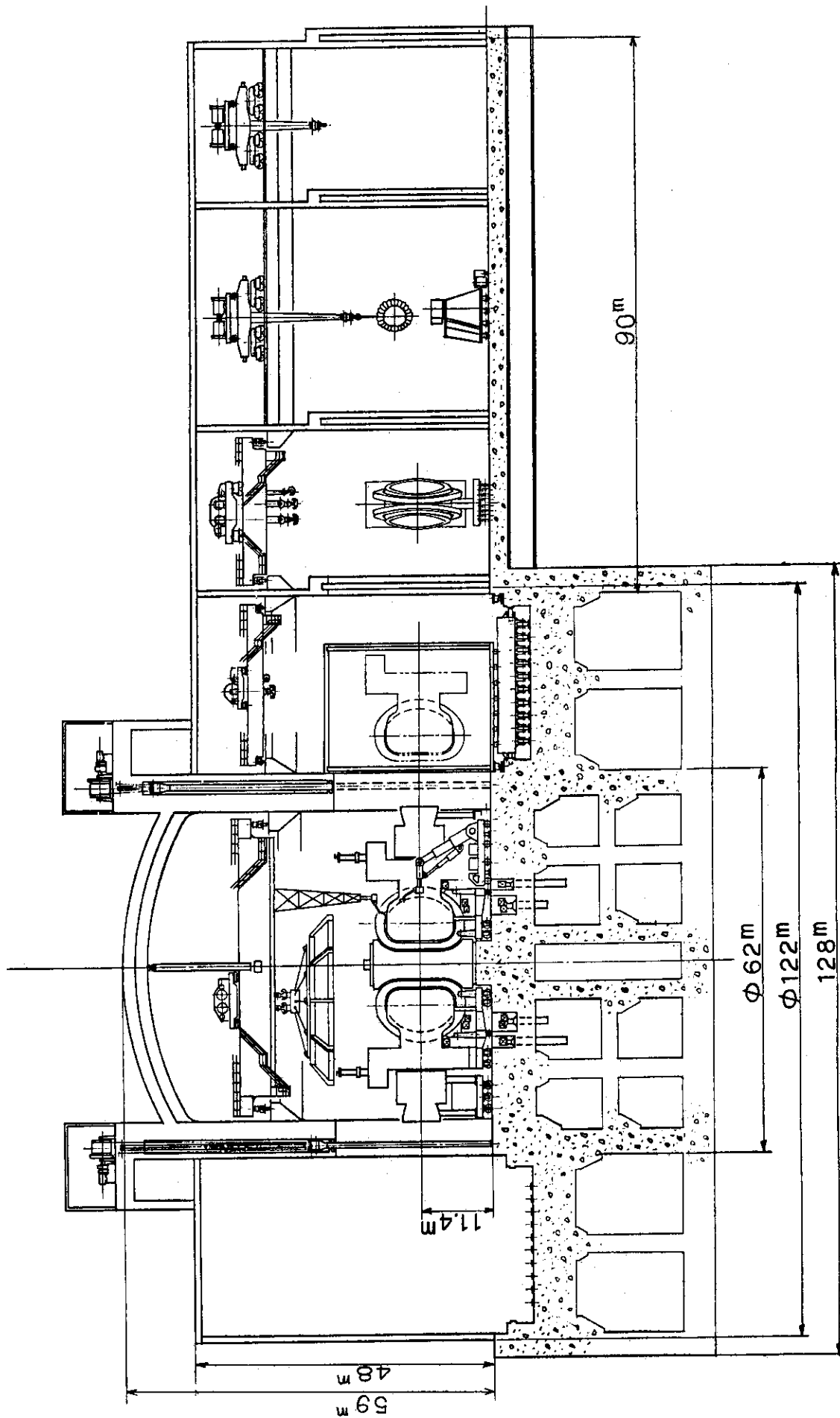


Fig. 3.31 解体作業概念図

3.5 自動溶接機

(1) パイプ自動溶接機

パイプの溶接箇所としては、ブランケット冷却配管を想定する。この結合方法は、フランジタイプ、溶接タイプの2種類が考えられ、フランジタイプを採用するならば当然溶接機は不要となる。

一般に、溶接部の信頼性を考えた場合、初層溶接後、裏はつりを行ない、裏面からの溶接をしたあと表面にもどって2層、3層という具合に溶接することが多い。

しかし、今回の場合のように管の肉厚が薄く、しかも長い管を継ぐケースでは、外側からの一層溶接で行なわなければならない。

バックパージとして、配管内には不活性ガスのヘリウム（核融合ではヘリウムガスを大量に使用するためこのヘリウムを借用できる）を充満させることが可能なので、裏波面はかなり良いと判断される。ここでは自動配管溶接として実績のあるTIG溶接法を行う。

従来から使われている自動配管溶接装置の中で、200 Aのパイプに適用できるものがあり、それによると管のまわり127 mmのスペースがあれば溶接を行なうことができる。

しかし、この装置は、マニピュレータによって取付け、調整しなければならず、精度や品質の点から実際に応用できるかどうか疑問が残る。したがってモデル実験を行ない、仕様通りの溶接が得られるかどうか確認する必要がある。

(2) 遮蔽壁真空シール部自動溶接機

溶接は自動TIG溶接とし、圧着ローラでシール板を押え密着させ、シール板端面の溶接部をそろえるため端面の切断を行い、切断直後を自動溶接する。シール板、圧着ローラ及び切断機については、2.1「解体前の準備作業」の項で述べた。これらの装置は単品としては特に技術的問題はない。問題となるのは、遮蔽壁とトロイダルコイルとの間隙約150 mmを通過できる程度に装置が小型化し得るかどうかということである。

溶接条件としては、空冷式溶接トーチを使用し、溶接電流100～150 A、溶接速度200 mm/min程度とし溶接棒は不要とする。

溶接機は、専用の走行台車で移動させ、走行台車のガイドレールは炉モジュール遮蔽壁に取り付けるものとする。

走行台車の重量として次の値を仮定する。

台車ベース板	20 kg
シャー	6 kg
車輪及び駆動機構	10 kg
溶接トーチその他	10 kg
駆動モータ	8 kg
ギャボックス	6 kg
合 計	60 kg

自動溶接機の総重量として100 kgを仮定する。

走行速度は、溶接速度よりきまり 200 mm/min とする。しかし、走行台車には、シールドガス用のホースが接続されているので、シール部 1 周後走行台車はもときた道をひきかえす必要がある。復路は高速で走行させることが可能であるので 10 m/min とする。この時の動力を求めると次のようになる。

$$P = \frac{10}{101.97} \times \frac{W \cdot v}{\eta}$$

W : 台車重量	100 kg
v : 走行速度	1 m/min
η : 効率	50 %

$$= 0.33 \text{ kW}$$

したがって、走行台車の動力としては 400 W を考えればよい。走行は遮蔽壁に設けたレール溝をコーン型車輪が圧着しつつ回転することにより行なう。

走行速度は、溶接姿勢の変化に対応しプログラム制御で変えるものとする。溶接点の検出制御は、シール薄板端部を差動トランス型ナライ装置でフィードバック制御するものとする。これら制御は、通常の自動溶接機でもコンパクトな装置でおこなわれており、従来技術がそのまま応用できる。

走行台車で問題になるのは、ケーブルの処理である。台車にケーブルを直接接続した場合、ケーブルの自重、走行時のケーブルの摺動抵抗などで相当な動力損失を生じる。したがって、本装置では、遮蔽壁に設けたシューから走行台車に設けたブラシを介して動力を得る構造とする。

Fig. 3.34 に示すように、自動溶接機高さは約 190 mm 程度である。この装置では、トロイダルコイルと遮蔽壁の間隙 150 mm を通過することは不可能である。したがってよりコンパクトな自動溶接機の開発が必要であろう。

ここでは、Fig. 3.32 に示すように、遮蔽壁の形状を変えることによりこの問題を解決した。

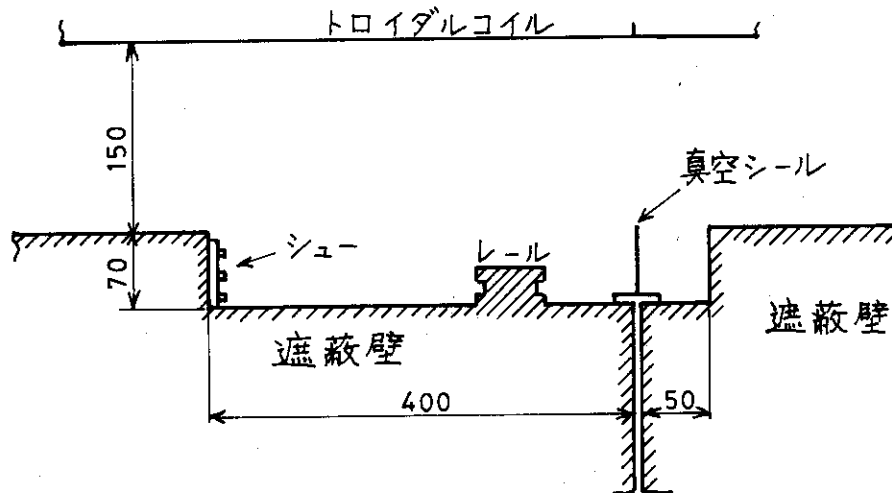


Fig. 3.32 遮蔽壁結合部形状

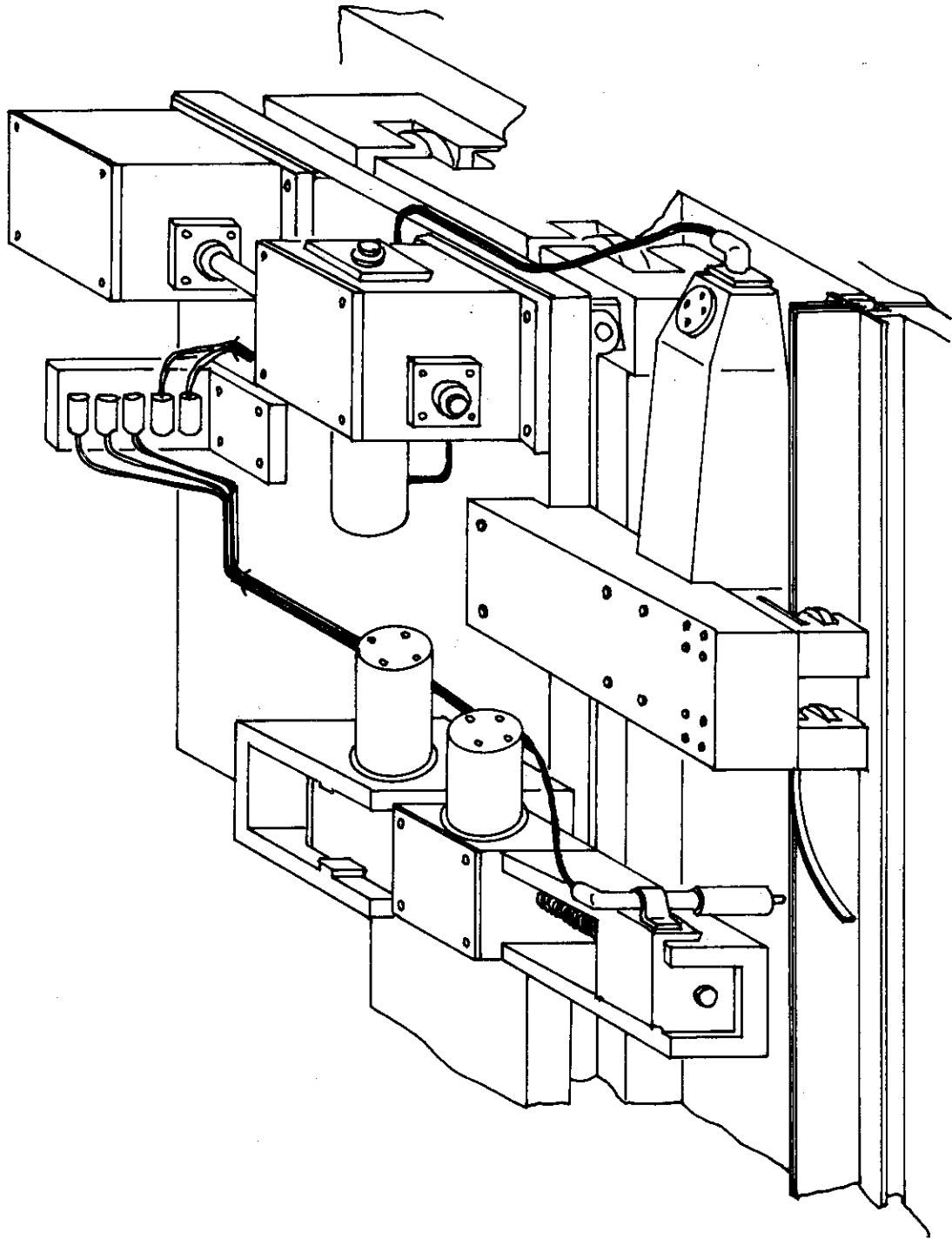


Fig. 3.33 自動切斷接機概念圖

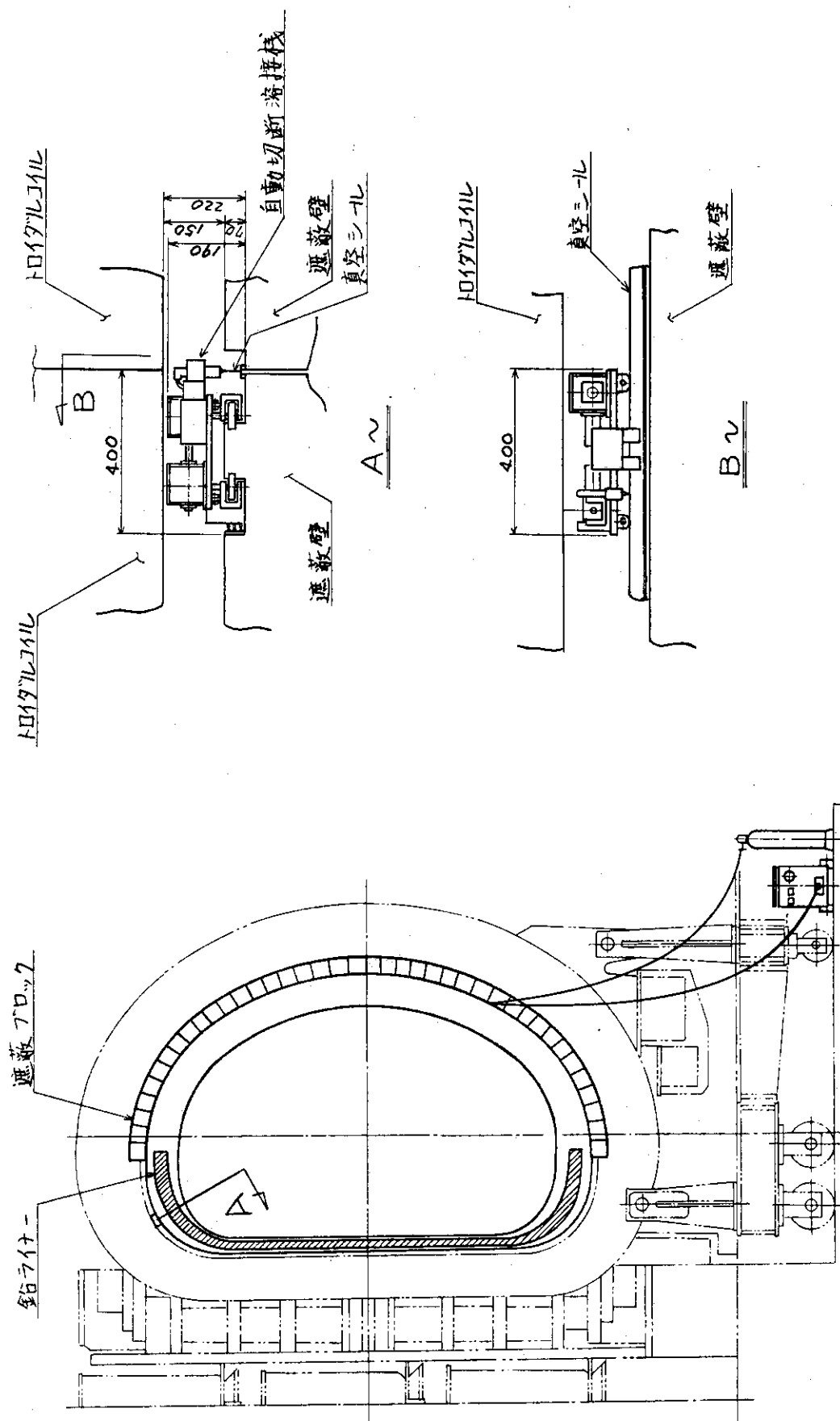


Fig. 3.34 自動切断溶接機取付図

3.6 溶接部の検査法

(1) 概 要

一般にどんな装置でも、使用前検査、使用中検査、定期検査、故障修理後の検査が行なわれる。

従来の原子力関係では、使用前検査がほとんどであり、使用中検査としては、圧力容器の内部損傷や配管の腐食程度を調べるもので、その検査技術も充分確立されていない。

核融合炉の場合、放射線遮蔽壁の内側にはステンレス鋼板の内張りがあり、真空容器となっている。巨大な真空容器であるから、非常に長い溶接線が予想される。しかし、この容器製作及び検査に関しては、従来の原子力用圧力容器のそれを応用することにより可能である。また、これについては、使用前検査、即ち放射能雰囲気ではないので、人が接近し十分な検査を行なえるから問題は少ない。従って今回の核融合炉の分解修理では、分解修理後の検査を対象とし、さらに溶接部の検査という狭い意味で検査方法を述べる。具体的には、真空容器分割部とブランケット冷却配管の溶接部（フランジ脱着方式にすれば、この溶接部はなくなるが、最終的にどちらの方式にするか不明なので一応検討しておく）の2ヶ所が考えられる。

はじめに、各種の非破壊検査法を説明し、その後実際の2ケースについてどのように適用できるか、あるいは将来の可能性はどうか検討する。

(2) 各種の非破壊検査法

被検査物の溶接部を検査する場合、便宜的に、表面欠陥プラス内部欠陥と貫通欠陥の2種類に分ける。

非破壊検査には様々なものがあるが、核融合炉の場合、次のものを使用する。

表面欠陥や内部欠陥を探傷するためには、超音波検査、渦流検査、電気抵抗検査を用い、溶接部を貫通しているピンホールやヘアークラックについては、ヘリウムガスを使った漏洩検査を行なう。X線検査については、炉室内および炉（真空容器）内が放射能で汚染されている状態なので、使用不可能である。磁気検査については、被検査物が非磁性材料（ステンレス鋼）なので使用できない。

浸透検査に関しては、もしピンホール等があっても染料あるいは蛍光物質がその小孔をふさいでしまうおそれがあるため、そのあとに行なう漏洩検査ができなくなるので使用不可能である。

次に、今回使用する検査方法を簡単に説明する。

(i) 超音波検査

超音波検査法は、可聴音を越えた音波（普通は0.5～15 Mcの周波数）を使って、内部欠陥あるいは不均一層の存在を検知する方法である。

適当な厚さの水晶板あるいはチタン酸バリウム製の板の両端面に、ラジオ周波の電気振動を加えると板が機械的振動を生じ、逆に超音波の機械的振動を受けると、両端面に正、負の電気を発生して電氣的振動に変える。超音波は波長が短い（鋼中10 Mcでは、約0.6 mmの波長）ので直進する性質を持っている。

鋼中に超音波を侵入させるには、水、油またはグリセリンなどを鋼の表面に塗って、超音波の発振用探触子を接触させる必要がある。

超音波探傷には、透過法、パルス反射法、共振法（連続波法）などがある。

透過法は精度は低いが、薄板あるいは表面近くにある欠陥を見出すのに便利である。

パルス反射法は、溶接部、鋳物鍛造品及び圧延素材の欠陥検査によく用いられる。

共振法は、薄板の厚さ測定、板中の欠陥（ラミネーション）の検査、あるいは操業中の反応容器の厚さ測定から腐食状況を知るなどの目的に使用される。¹⁾

(ii) 渦流検査

渦流検査は、金属内に誘起される渦動電流の作用を利用する比較的新しい非破壊検査方法である。

金属の表面あるいは表面に近い内部の諸欠陥（割れ、ブローホール、空孔、すじきず、介在物、表面ピット、アンダカット、重なり、溶け込み不足、融合不良、へこみ）はもとより、金属の化学成分、顕微鏡組織および機械的、熱的履歴をも検査できるほか、細管の寸法検査、各種の材料選別にも利用できる極めて効果的な非破壊検査法である。

最近では、原子力工業および化学工業に多量に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼管（特に細管）の欠陥検査や腐食度の検査に威力を発揮している。

1例として Fig. 3.35 を示す。これは、管外の探子コイルによる傷の検査方法の略図である。管を軸の周りに回転させて検査し、ブラウン管オシログラフ上に画かせるものである。¹⁾

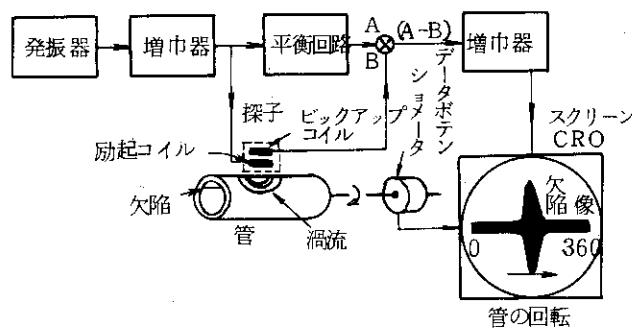


Fig. 3.35 管の渦流検査

(iii) 電気抵抗検査

電気抵抗法とは、電気抵抗効果により表面および比較的表面に近い欠陥の検出（例えば軌条探傷、溶接部の検査、薄板中のラミネーションの検出、表面きずの深さの測定）を行なうものである。

金属の表面に亀裂があったり、また不連続であったりすると、亀裂を横切って与えた電流はその流れを乱される。そして亀裂によって電気抵抗が増加する。4つの針が亀裂を横切って並んでいると、Fig. 3.36 のように一定電流は、PとQの間を流れる。そしてL

とM間の電位差は、亀裂の深さによって変わる。即ち、クラックがないときのL, M間の電位差を V_0 として、クラックがある時を V とすると、 V/V_0 はクラック深さと比例する。

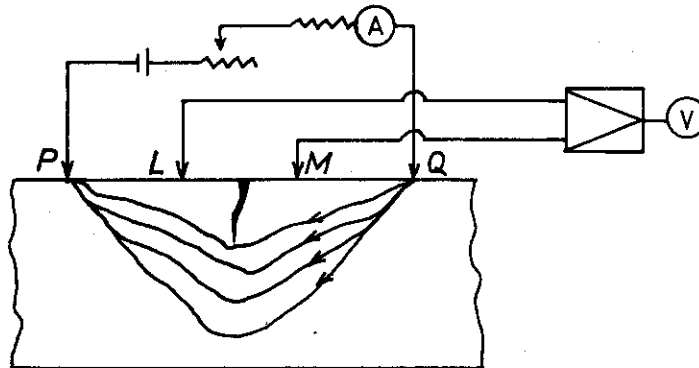


Fig. 3.36 電気抵抗検査概略図

(iv) 漏洩検査.

この方法は、他の非破壊検査では見出すことができないような細かいピンホールやヘアークラックのうち、肉厚を貫通しているものを発見するのにすぐれている。

漏洩試験には、真空法と加圧法とがある。いずれの方法にしても、ヘリウムガスを用いる場合が最も感度が良い。幸い核融合では、ブランケットの冷却媒体にヘリウムガスが使われているので、特にテストのためにヘリウムガスを調達する必要がなくなるので好都合である。

今回提案するのは、ヘリウム加圧法である。真空法は、核融合のような巨大真空容器の場合、非常に感度が悪くまた応答が遅れるので不適當である。

従来行なわれている加圧法による試験方法を Fig. 3.37 に示す。ところが、大型試験機などでは、漏洩試験機 9 をいちいち被試験部 2 の近くまで移動しなければならない、またはパイプ 10 を長くしなければならない。いずれの場合も、試験の作業能率が低く、また後者の場合は、パイプ 10 の長さ、内径、曲がりなどがパイプ内のガス流形態、更にパイプ内圧に影響を及ぼし、その結果、試験感度が著しく変動するから、たえず感度チェックを繰返さなければならない。

そこで、従来の問題点を解決するために創案されたものが、サンプリング法と呼ばれるものである²⁾。その目的は、漏洩試験の作業性、信頼性、経済性を大巾に向上させるためのものである。

ヘリウムガスを用いたサンプリング加圧法の最小検知量は、 10^{-9} at m cc/sec (内外の圧力差 1 気圧) 程度である。

Fig. 3.38 により簡単に説明すると、1 は被試験体、2 は被試験部、3 はビニールシート、4 は接着テープ、5 はガス捕集部、6 はガスボンベ、7 は漏洩検知ガスで、被試験体にガスボンベから漏洩検知ガスを加圧封入して、所定時間放置する。この間に、被試験部に小孔 11 等があれば、これを通じ漏洩検知ガスがガス捕集部内に流入する。次いで、

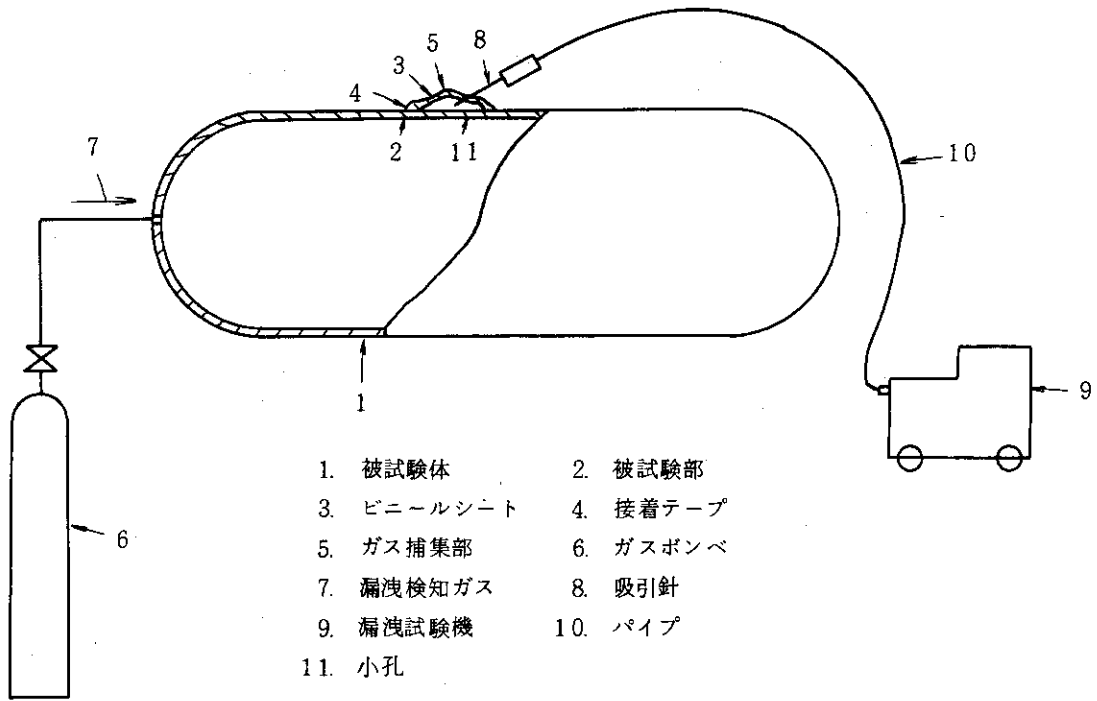


Fig. 3.37 従来の加圧試験方法の装置概略図

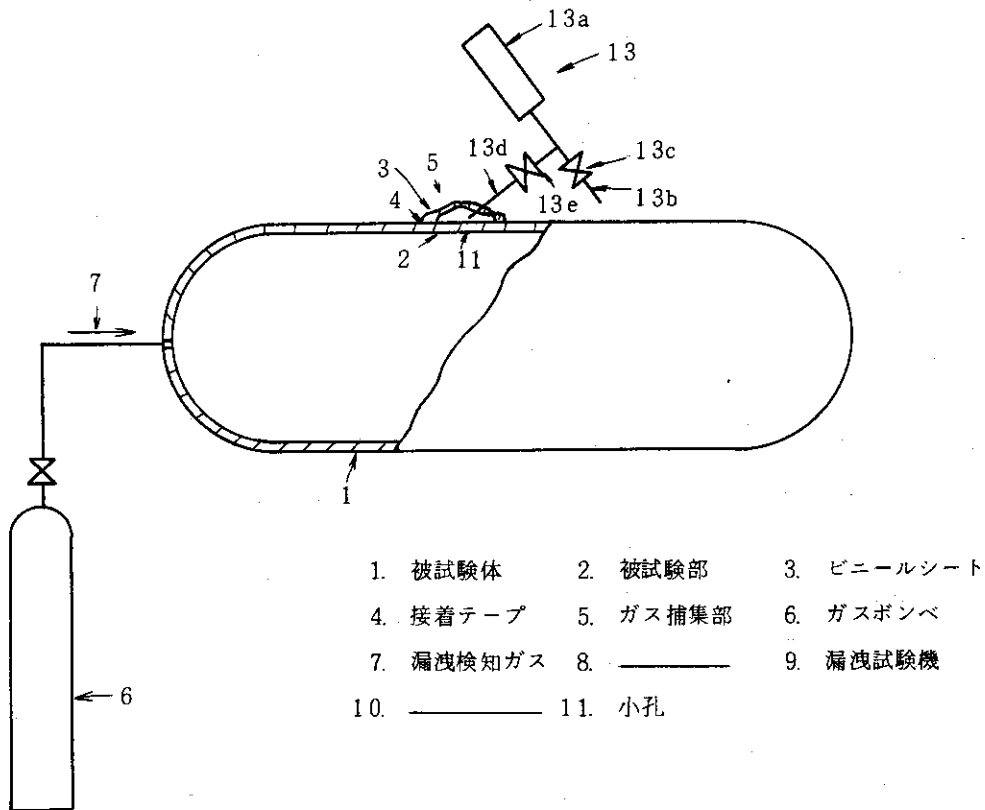


Fig. 3.38 サンプルング加圧法による採取状況図

ガス捕集部の内部容積に応じた採取容器 13 を予め真空にしておき、これをガス捕集部に接続して、その内部ガスを大気圧まで採取容器内に採取した後、この採取容器を所定の場所に設置された漏洩試験器 9 まで運び、これに接続して容器内の漏洩検知ガスの有無を調べる。この時、小孔等があれば、漏洩検知ガスが検知される。採取容器 13 は、Fig. 3. 39 のようになっている。

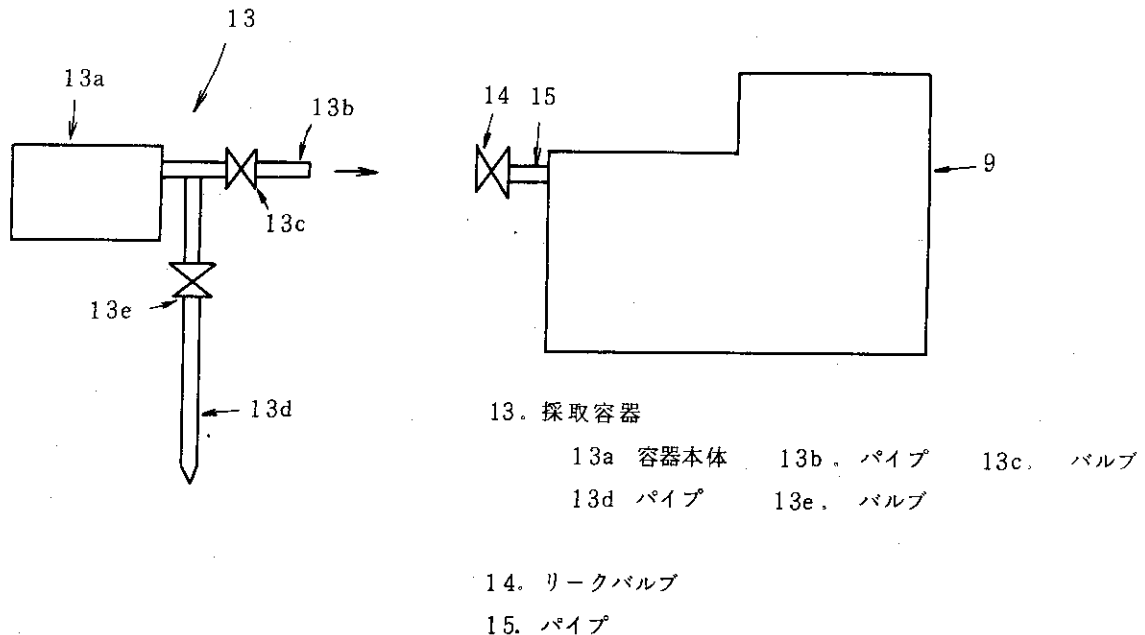


Fig. 3.39 サンプルング加圧法による試験前の状況を示す概略図

このサンプルング加圧法は、以上のようにガス捕集部の内部容積に応じた採取容器を用い、これを予め真空にしてガス捕集部に接続すれば、簡易、確実にガス捕集部の内部ガスを採取できる。

このような採取容器を用いるために、被試験部の近傍に漏洩試験機等を移動する必要がなく、またその移動に伴う電気配線等を省くことができ、また被試験部の位置を問わず漏洩ガスを簡易、確実に採取でき、作業性が著しく向上する。また、従来のような長尺の接続パイプを用いないので、試験の信頼性を常に高く確保できる。更に被試験部が多数あっても、漏洩試験機等は各漏洩試験に専属させることなく共用して試験を行なうことも可能であり、この場合、高価な試験機等の台数を削減できるというメリットがある。

今回のような核融合炉に適用する場合、すべて遠隔操作で行なうということが要求されるので、マニピュレータ作業という点からできるだけ単純な試験方法が良い。その点、このサンプルング加圧法は最も適しているといえよう。

(3)(i) 真空容器分割部における溶接部の検査

真空容器分割部は、Fig. 2.14 に示されているように、高さ約 11 m、巾約 7 m の D 形状の縁を溶接してある。トーラスの内部では、トロイダルコイルとのすきまが 150 mm しかないので、そのスペース内で検査を行なわねばならない。また外側では、鉛の遮蔽ブ

ロックをはずせば内側より条件は良いが、両隣りにフランジがあるので厳しいことには変わりはない。真空シール部を拡大すると、Fig. 2.15 のようになっており、分解修理後に必要とされる検査箇所はへり継手のところである。溶接線は非常に長い、曲率半径が大きいのでほぼ直線と考えて良い。

従来から、突合せ溶接やすみ肉溶接とは異なり、このような薄板のへり継手の場合における表面および内部欠陥の検出は、とても難しいとされている。一般にこのような場合は漏洩検査のみを行なっている。表面及び内部の欠陥を検出する方法で、可能性のあるのは超音波探傷であろう。しかし、この核融合で使用される薄板は、非磁性のステンレス鋼板であるから、超音波検査の特性上ますます検出困難である。Fig. 2.14 を見ると、炉本体の強度に関係するのはM 100 のボルトであり、このへり継手部は真空シールの役目のみ果たせば良い。したがってこのケースも、漏洩検査を主体と考えて良いだろう。但し、もし内部欠陥が存在し、後日内部のクラックの成長によりリークが生じると問題であるから、表面および内部欠陥を検出する非破壊検査法の確立は重要と思われる。

漏洩検査としては、先に述べたヘリウムガスを用いるサンプリング加圧法を行なう。真空容器分割部の溶接線は非常に長いので、リークがある場合、どこから洩れているかを突きとめるのはたいへん難しい。特にヘリウム加圧法で注意しなければならないのは、マスキングの方法である。適当な箇所をマスキングしても、決して良い成果は得られない。最初は、全周をいくつかの大きなブロックに分けてマスキングを行ない試験する。どこのブロックからリークしているかというだいたいの目安をつけてから、そのブロックを細かく分け、だんだんと範囲を狭めていく方法が最も実用的と思われる。Fig. 3.40 に真空容器分割部の漏洩検査概略図を示しておく。

それから、真空容器の外側では、遮蔽用の鉛ブロックをとると人が絶対に近づけないほど放射能が強い。したがって、検査作業のすべては、遠隔操作によってTVカメラで監視しながらマニピュレータ操作しなければならない。

(ii) ブランケット冷却配管溶接部の検査

Fig. 3.41 に示したように、新しいブランケットを故障したブランケットの代わりに遮蔽壁内に装入する場合、16 箇所の配管溶接（4.2章、ブランケット支持固定法……第2案 Fig. 4.13 を参照）を行ない、その後充分な非破壊検査をしなければならない。取合いは非常に厳しく、各パイプ間のすきまは約 200 mm ぐらいしかない。その上、放射能が非常に強く、あらゆる検査作業はすべて遠隔操作によるマニピュレータで行ない、狭いスペース内を自由に動作するものでなければならない。

まず第1段階として、超音波検査あるいは渦流検査、電気抵抗検査を用いることによって、溶接部の表面および内部欠陥を検出する。真空シール部と異なり、長期的な強度も要求されるので厳しい管理が必要である。

これらの方法は、比較的大きな欠陥を見出すには便利であるが、径の小さいピンホールやヘアークラック検出については、問題が残る。

超音波検査は、非磁性材料のステンレス鋼に関して減衰が激しく、欠陥検出が判断しにくい。電気抵抗検査は、非能率的で精度があまり良くない。したがって渦流検査が最も適

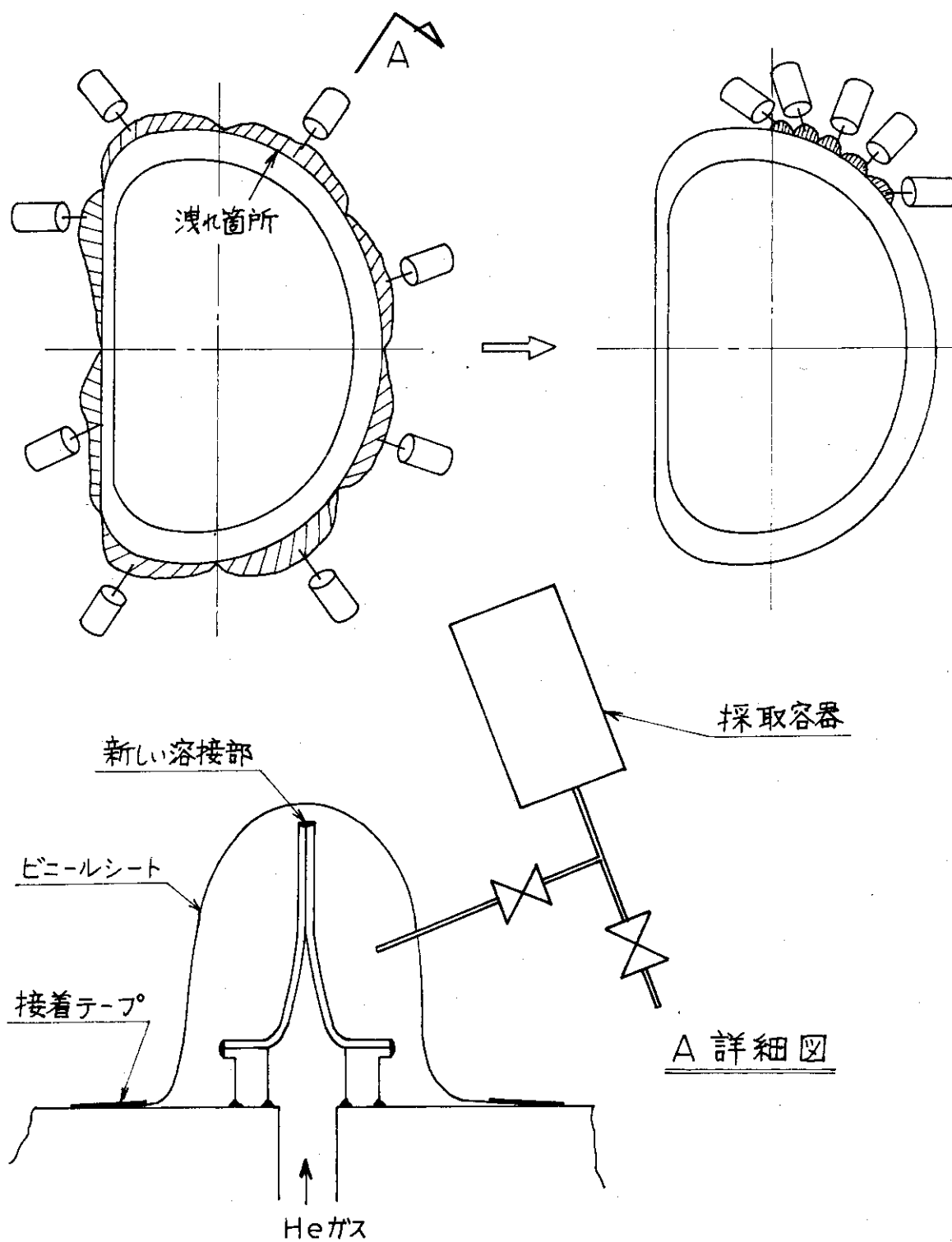


Fig. 3.40 真空容器分割部の漏洩検査概略図

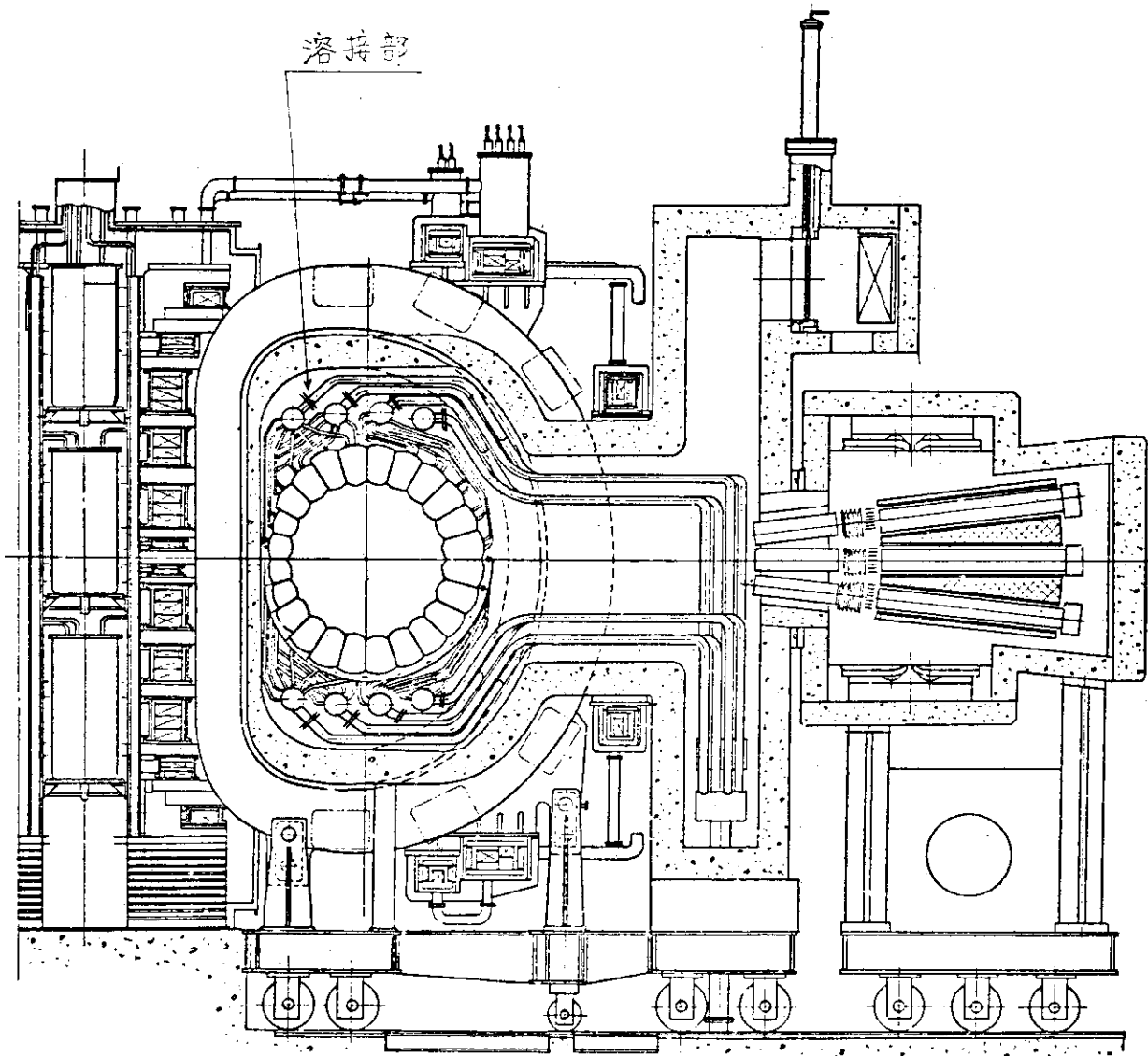


Fig. 3.41 炉モジュール構造

しているように思われる。けれども、見逃がしたほんのわずかなクラックが、長い間にだんだん成長し、強度的に問題を起こしたり、洩れを起こすことも考えられるので、マイクロオーダーの欠陥を捜し出せるような改良が望まれる。

第2段階として、漏洩検査を行なう。先に述べたヘリウムガスを使うサンプリング加圧法で試験する。原研の試算によると、冷却媒のヘリウムガスが10気圧のとき、ブランケットセルに0.1 mmのピンホールがあると、10 atm cc/sec. のリークが生じ核融合反応は停止する。³⁾

核融合炉のブランケット配管溶接部は、全部で約10000箇所あるが、溶接1箇所当りの許容リーク量を次の如く推定する。

$$10 \text{ atm cc/sec} \div 10000 = 10^{-3} \text{ atm cc/sec}$$

安全率をどの程度にとるが異論もあるが、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ atm cc/sec ぐらいが許容リーク量として妥当ではないかと思われる。

したがって、16箇所の新しい溶接部においても、上記の値を基準として、それを越えるものについては溶接を完全にやり直すものとする。この程度の検出量であれば、ヘリウム加圧法で十分に検査可能である。

(4) まとめ

真空容器分割部、ブランケット冷却配管溶接部とも、共通していえる大きな問題点は、非常に狭いスペースで検査しなければならないこと。しかも人の手を借りられず、すべて遠隔操作によるマニピュレータで処理しなければならない点である。

また、核融合のような厳しい要求のあるものに対して、漏洩検査以外の非破壊検査の中では、満足のいく高精度な装置がまだ開発されていないことである。

以上2つの課題は、炉の運転に直接結びつく問題なので、早急に試作開発を行ない、実際に可能かどうか検討する必要がある。

参考文献

- 1) 「最新溶接ハンドブック」 鈴木 春義 著 山海堂
- 2) 特許出願中 住友重機械工業(株)
- 3) 炉設計研究室 : JAERI-M7300(1977)9月
「核融合実験炉第1次予備設計」

3.7 ブランケット修理装置

ユニット内部の故障は、外部の遮蔽壁等を解体せずに、内部でパイプの切断溶接等の作業をする方針をとっている。従って、限られた空間の中で特別な作業をする専用機が必要になってくる。ブランケットの修理に必要な装置をまとめると次のようになる。

(イ) 天井走行クレーン

3.3「天井走行クレーン」参考のこと。

(ロ) 自動溶接切断装置

3.5「自動溶接機」参考のこと。

(ハ) 溶接部検査装置

3.6「溶接部検査法」参考のこと。

(ニ) 中央制御装置

クレーン、作業車等の制御機構。

(ホ) 作業車

解体準備作業を行う。又、クレーンと連動した完全遠隔操作がなされなければならない。

(ヘ) 各種作業ヘッド

ボルト着脱用レンチ、開先加工用カッタ等、作業車のパワーアームの先に取り付けて使用する。

(ト) ブランケット引き抜き装置

ブランケットユニットを炉モジュール内から搬出し、再度装入するための装置。

以下は(ト)ブランケット引き抜き装置について検討する。ブランケットユニットは、1体で引き出す場合を想定した。

(1) ブランケット引き抜き装置

① 概要

引き抜き装置としては、ラック・ピニオン方式、レバー方式及びウィンチ方式等が考えられる。ここでは、確実に、しかも場所をとらず、前進後進可能な、ラック・ピニオン方式を採用する。

全体図は Fig. 3.44 に示す。

② 引き抜き駆動装置

(i) 駆動機構

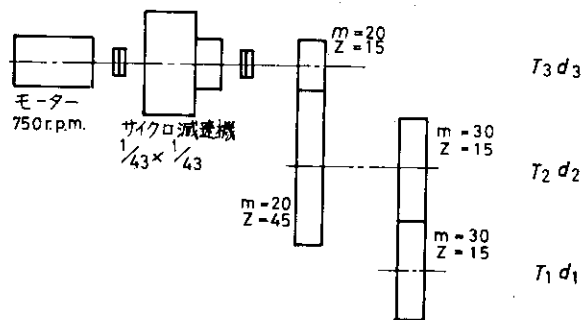


Fig. 3.42 引き抜き駆動装置機構

この機構では、走行速度約 20 cm/min を得ることができる。

(ii) 走行抵抗

ブラケットサポートと受け台の間に二硫化モリブデンをコーティングする。その時の摩擦係数、 $\mu = 0.1$ ，ユニット重量 250 ton であるから、

走行抵抗 $W = 250 \times 0.1 = 25 \text{ ton}$ となる。

(iii) 歯車の強度及びモータ馬力

各軸に働くトルク、接線力及び軸径は、Table 3.22 にまとめる。

Table 3.22 引き抜き装置歯車のトルク、接線力、軸径

記号	T (t · m)	P $\frac{\text{小歯車}}{\text{(t) 大歯車}}$	d (mm)
1	5.6	$\frac{25}{25}$	40
2	5.9	$\frac{26}{13}$	40
3	2.1	$\frac{14}{-}$	30

サイクロ減速機の効率を 75 % とすると、モータ所要トルクは、

$$T = 2100 \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{43} \times \frac{1}{0.75} = 1.5 \text{ kg-m}$$

所要モータ馬力は、

$$H = \frac{TN}{974}$$

$$= \frac{1.5 \times 750}{974} = 1.2 \text{ (kW)}$$

となる。モータ馬力は、1.5 kW を選定する。

歯車としては、使用頻度が非常に少ないので、曲げ強度のみを考慮する。Lewis の式より、歯車の仕様をまとめると Table 3.23 のようになる。

Table 3.23 引き抜き装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯 幅 B (mm)	歯 数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	接 線 力 P (t)	伝達可能接線力 P' (t)
1	—	—	—	—	—	—
	30	85	15	450	25	27.3
2	30	85	15	450	26	27.3
	20	70	45	900	13	20.7
3	20	70	15	300	14	15.0
	—	—	—	—	—	—

(3) 台 車

(i) 台車重量

台車の重量は、Fig. 3.44 を参考にして概略計算すると 362 トンになる。

車輪が支持する重量は、

ブランケットユニット	250
台 車	362
車 輪	13
<hr/>	
合 計	625 トン

以下 650 トンとして検討する。

(ii) 走行抵抗及び車輪強度

車輪 1 個が支持する重量は

$$W = \frac{650}{16} = 40.7 \text{ (トン)}$$

その時のヘルツ面圧は 43.1 kg/mm^2 である。したがって、材質に YUS 304 N (許容応力 59.1 kg/mm^2) を選定すればよい。

また走行抵抗は、 起動時 $W_r = 29.3 \text{ トン}$

走行時 $W_r' = 17.1 \text{ トン}$

となる。

(iii) 駆動装置

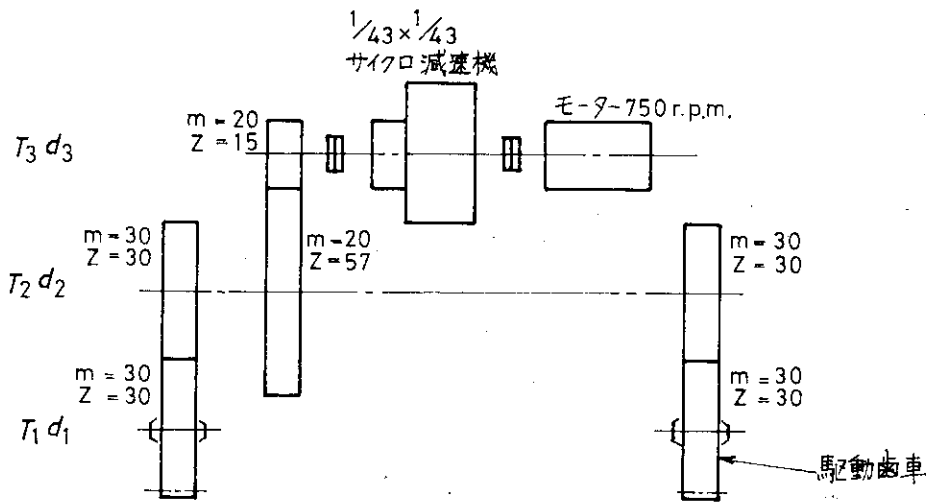


Fig. 3.43 引き抜き用台車駆動装置機構

Fig. 3.43 の駆動機構のものを使用すると、駆動速度は約 300 mm/min になる。
歯車の仕様は、Table 3.24, 3.25 のようになる。

Table 3.24 引き抜き用台車駆動装置歯車のトルク、接線力、軸径

記号	T (t·m)	P (t)	d (mm)
1	6.7	14.65	40
2	13.9	$\frac{15.5}{16.2}$	45
3	3.8	16.9	30

Table 3.25 引き抜き用台車駆動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯数 Z	ピッチ円直径 D (mm)	歯幅 B (mm)	接線力 P (ton)	伝達可能接線力 P' (ton)
1	30	30	900	40	14.65	15.9
2	$\frac{30}{20}$	$\frac{30}{57}$	$\frac{900}{1140}$	$\frac{40}{80}$	$\frac{15.5}{16.2}$	$\frac{15.9}{41.8}$
3	20	15	300	80	16.9	17.1

またモータ馬力は 1.5 kW を選定する。

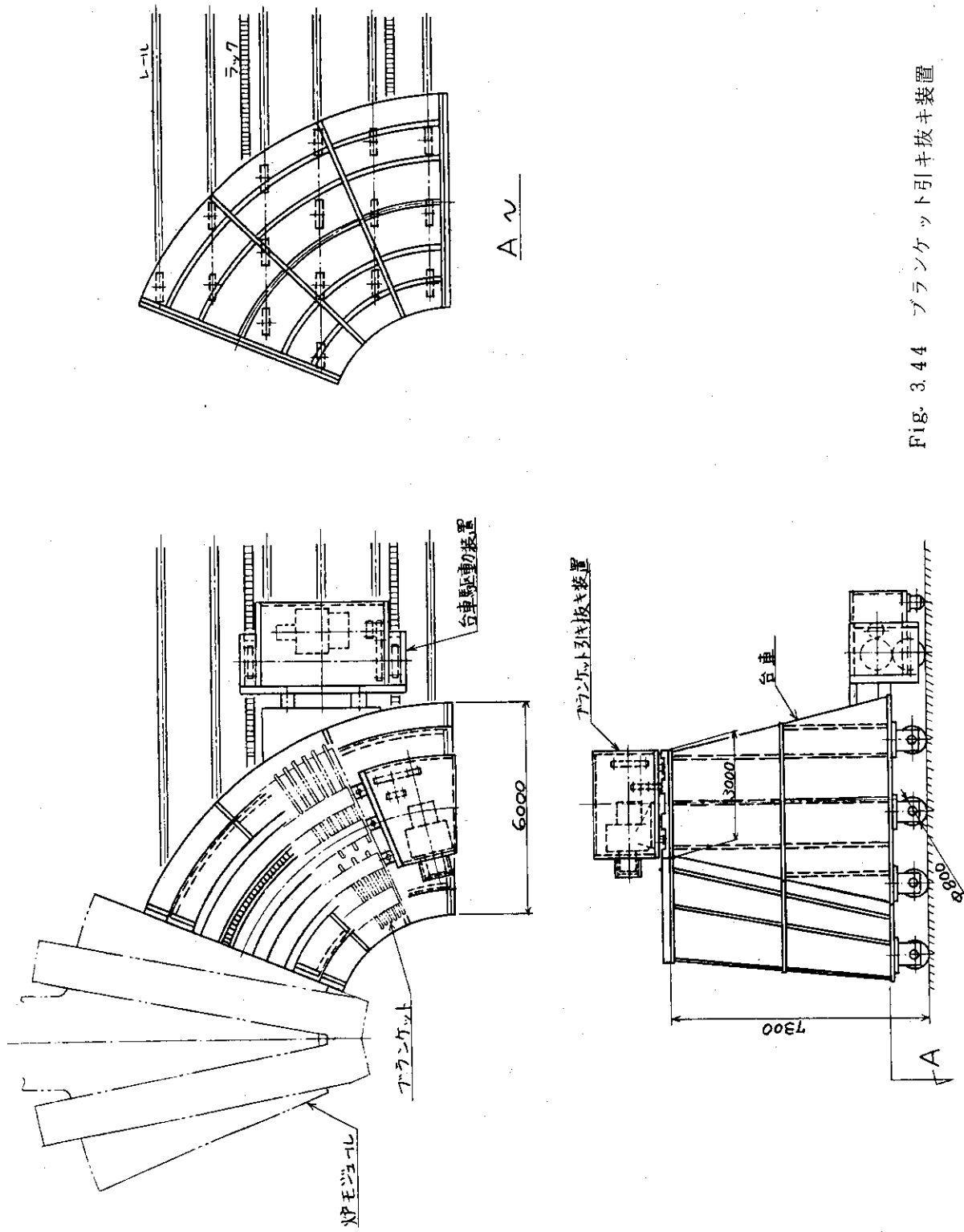


Fig. 3.44 ブランクェット引抜き装置

4. 炉の構造設計

4.1 炉の耐震解析

地震時における実験炉の安全性を確認するために、炉本体が地盤に対し滑動する場合と、固定された場合について解析を行なう。

(1) 構造概要

炉モジュール1個の構造概要をFig. 4.1に示す。

(2) 解析条件

(i) 炉の据付位置に、下記の地震波を水平方向に入力し、動的解析を行なう。

入力地震波……………EL CENTRO 1940NS (Fig. 4.3 参照)

最大加速度…………… 0.3 G

解析継続時間…………… 10 秒

(ii) 滑動する場合、床との摩擦係数

$$\mu = 0.1$$

(iii) 炉体およびポート部等の減衰係数

$$2 \%$$

(iv) 鉛直方向地震は、水平方向と同時に考慮する。

設計震度 0.3

(3) 解析モデル

(i) 解析コード

解析は、NASA (米国航空宇宙局) が開発した有限要素法に依るプログラム NAS - TRAN (NASA STRUction ANalysis) を使用して行なった。

(ii) 炉体の応答解析モデル

耐震解析モデル図をFig. 4.2に示す。

(i) 各モジュールをA, B, C, D, E, F, G, Hとし、それぞれのモジュールについて、

○ 内側の質点

トロイダルコイル 894 t

トロイダルコイル用遮蔽 468

ブランケット 250

接続部遮蔽 150

合計 1762 t

上記を1質点としてモデル化し、AT, BT, CT, …… 等と表わす。

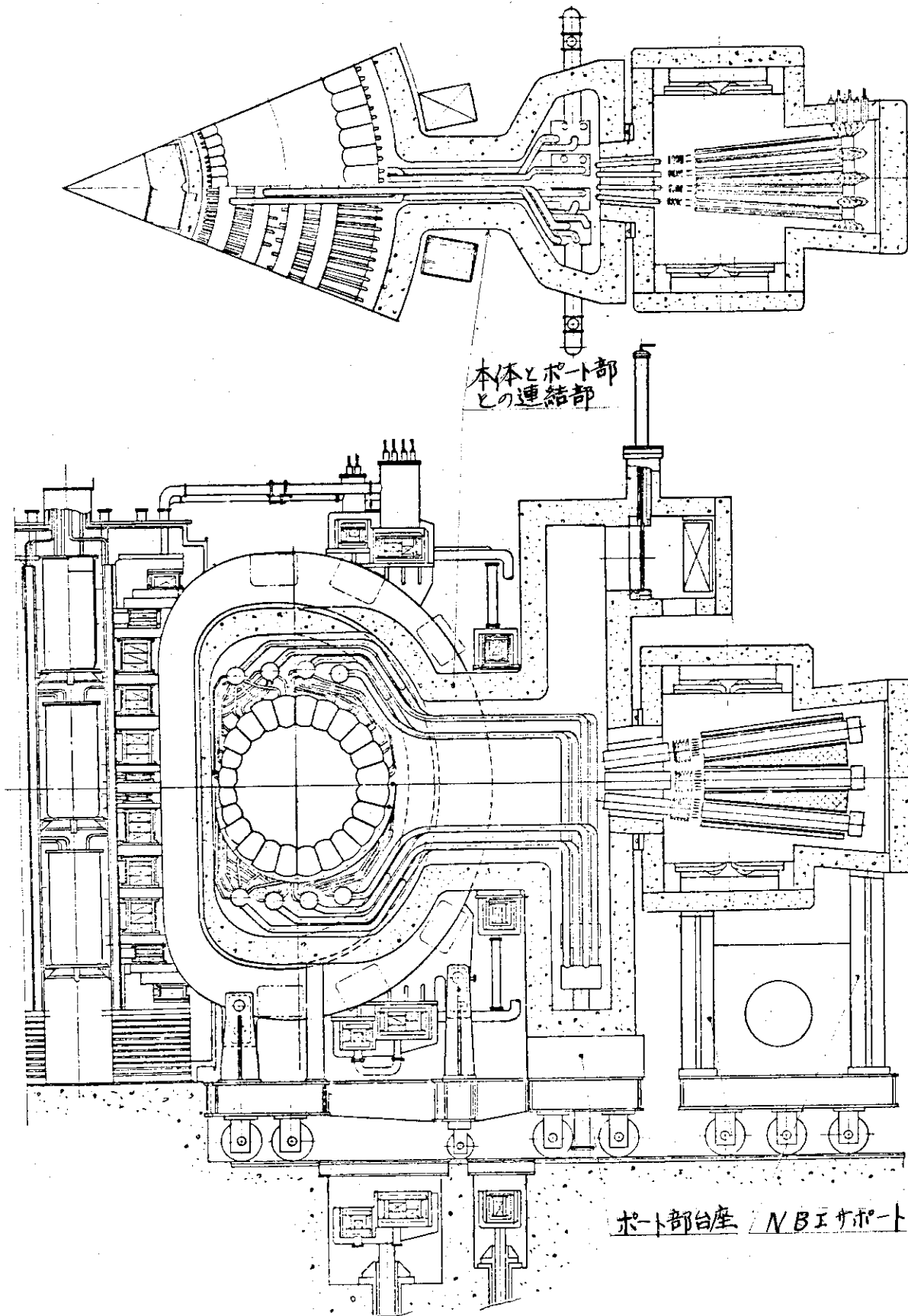


Fig. 4.1 如モジュール構造

○ 外側の質点

ポート部	1138 t
クライオポンプ部	203 t
NBI部	931 t
合計	2272 t

上記は、剛に結合されていると仮定し、1質点でモデル化し、AP、BP、CP、……等と表わす。

(ロ)(a) AT-AP等の結合部およびAPとその台車ASとの支持構造は梁モデルとしてモデル化する。

(b) 各モジュール間の外側結合およびATとその台車AWとの支持ビームは、線型バネとしてモデル化する。

(c) 各モジュール間の内側結合は、鉛ライナーどうし接触している。

(イ)(a) 各モジュールが単独の場合の解析モデルは、モジュール間の結合ボルトがないものとして、2質点系にてXおよびY方向の地震動に関して解析した。

(b) 各モジュールが結合されてトラスを形成している場合は、16質点系にてXおよびI方向の地震動に関して解析した。

(ニ) 入力波形としては、

滑動解析の場合 Fig. 4.4の応答加速度波形を、
 固定解析の場合 Fig. 4.3のエルセントロ波自身を、
 用いた。

(4) 解析結果

(i) 実験炉本体の耐震応答解析

(イ) 固有値解析

実験炉本体の固有振動数	Table 4.1
各次のモード形状	Fig. 4.6

(ロ) 滑動解析

(a) 入力地震波計	Fig. 4.3
応答加速度波計	Fig. 4.4
応答変位波形	Fig. 4.5

(b) 応答解析結果

炉モジュール結合ボルト断面力と応力値	Table 4.2
本体とポート部との連結部の断面力と応力値	Table 4.4
ポート部台座の断面力と応力値	Table 4.5
NBIサポートの断面力と応力値	Table 4.6

(ハ) 固定解析

入力波形として、エルセントロ波それ自身をインプットした。

炉モジュール結合ボルト断面力と応力値	Table 4.3
本体とポート部との連結部の断面力と応力値	Table 4.7

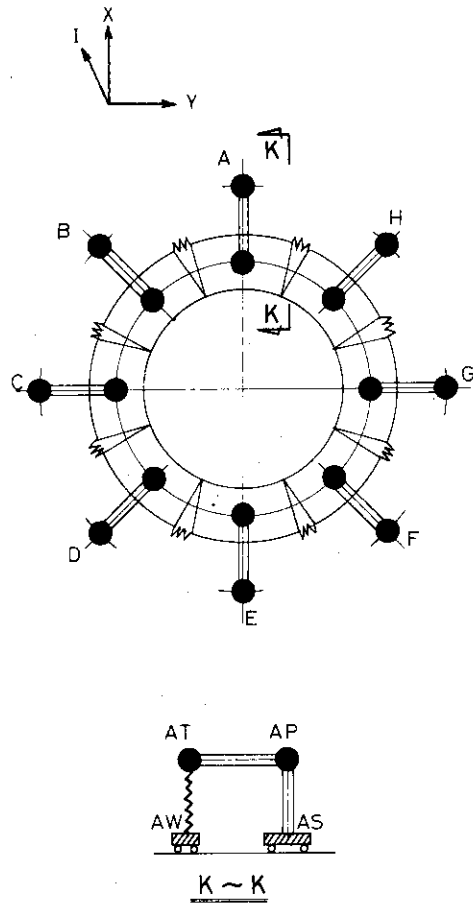


Fig. 4.2 耐震解析モデル図

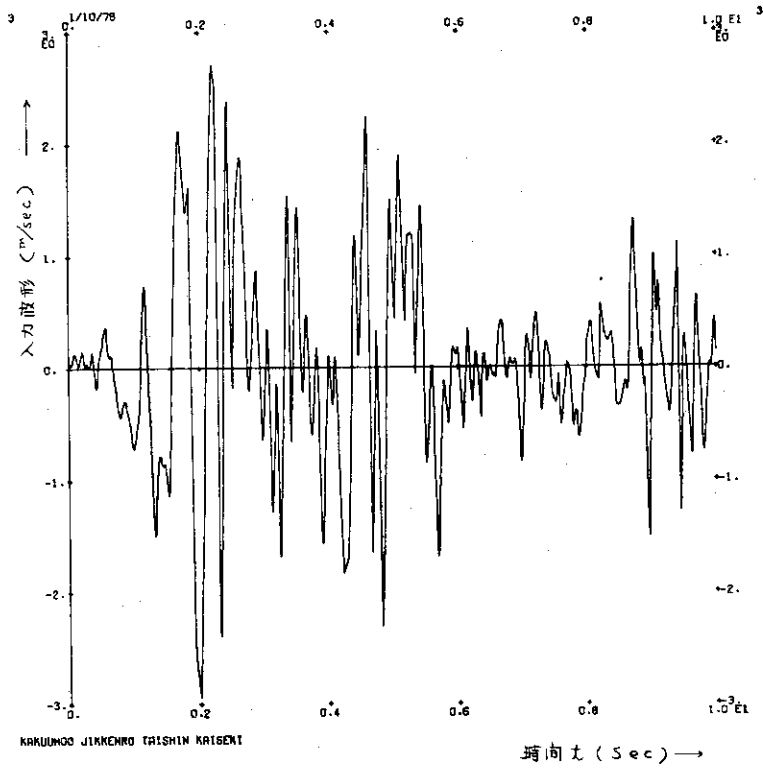


Fig. 4.3 入力地震波形 (エルセントロ波)

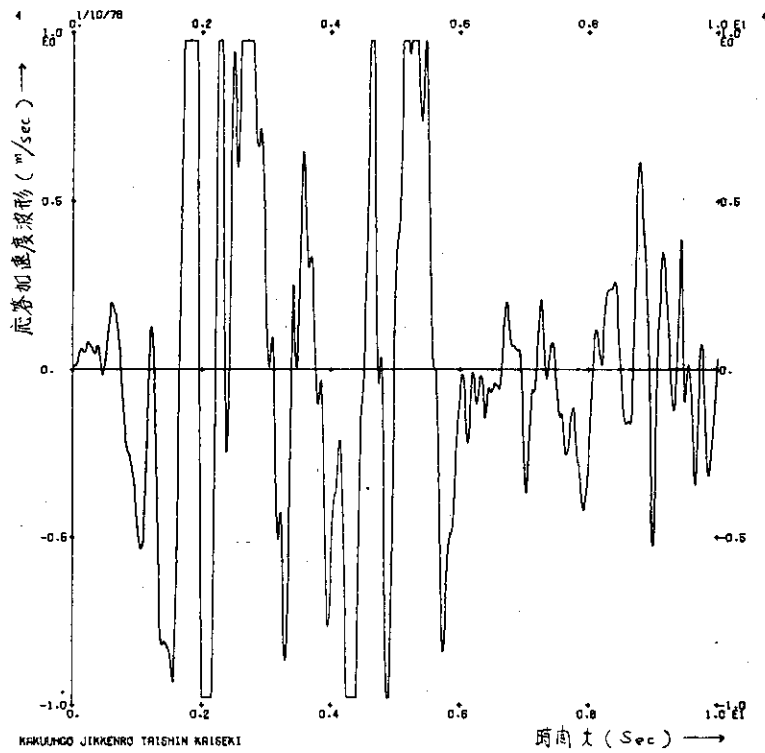


Fig. 4.4 応答加速度波形 (滑動解析)

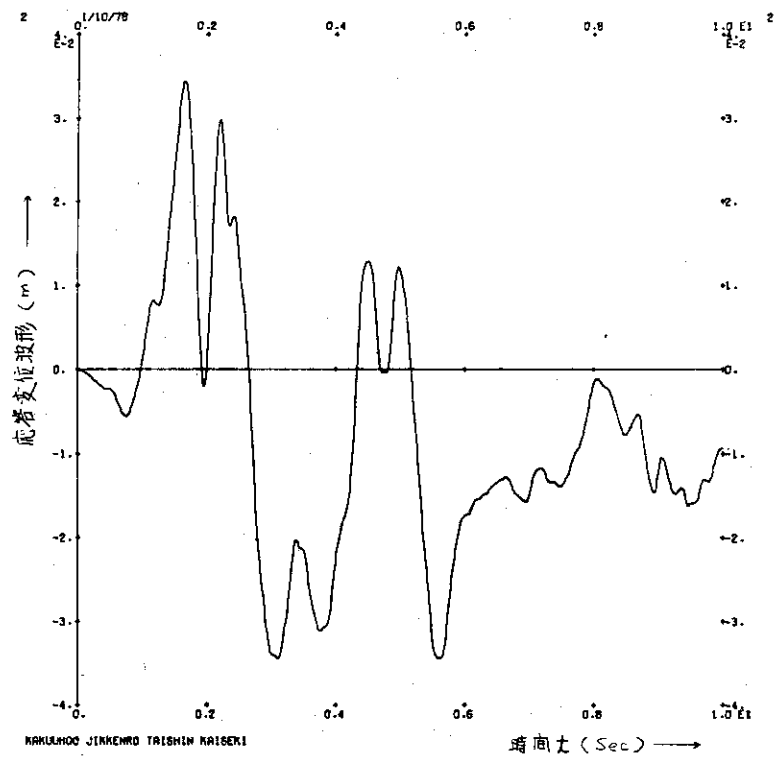


Fig. 4.5 応答変位波形 (滑動解析)

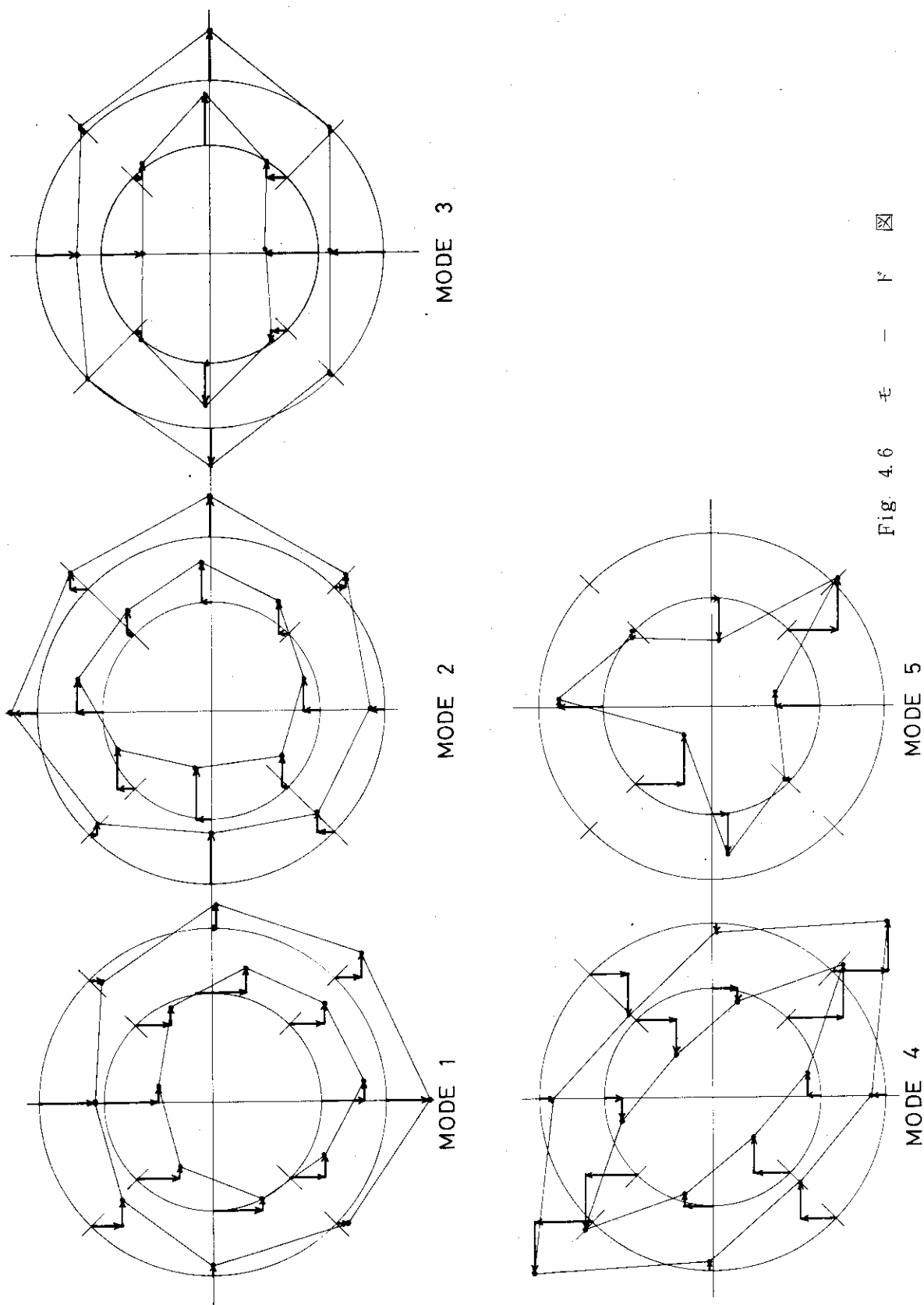


Fig. 4.6 ϵ - F \boxtimes

ポート部台座の断面力と応力値 Table 4.8

NBIサポートの断面力と応力値 Table 4.9

(ii) 炉モジュール単独の耐震応答解析

この場合は、故障した炉モジュールを移動させている時に地震が起きたものとして解析したので、滑動解析だけとなる。

(イ) 固有値解析

炉モジュール単独の固有振動数 Table 4.10

(ロ) 応答解析結果

各要素の断面力 Table 4.11

Table 4.1 全体系固有振動数

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)
1	7.46	0.134
2	7.89	0.127
3	8.26	0.121
4	9.82	0.102
5	11.21	0.089

Table 4.2 炉モジュール結合ボルト断面力と応力値 (滑動解析の時)

	地震方向	軸力 (t)	軸応力 (kg/cm ²)	剪断力 (t)	剪断応力 (kg/cm ²)
A-B	X	2116	770	3345	1218
	I	1516	552	2426	883
B-C	X	3129	1139	3061	1114
	I	2245	817	2202	802
C-D	X	5672	2065	5799	2111
	I	4165	1516	4889	1780

Table 4.3 炉モジュール結合ボルト断面力と応力値 (固定解析の時)

	地震方向	軸力 (t)	軸応力(kg/cm ²)	剪断力 (t)	剪断応力(kg/cm ²)
A-B	X	2354	857	3742	1362
	I	1721	627	2719	990
B-C	X	3477	1266	3427	1248
	I	2544	926	2486	905
C-D	X	6339	2308	7587	2762
	I	4715	1716	5496	2001

滑動解析の場合

Table 4.4 本体とポート部との連結部の断面力と応力値

炉モジュール	水平軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	鉛直軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)	振りモーメント (t・m)
A	4.22 × 10 ⁴	1.15 × 10 ⁵	1.49 × 10 ⁴	1.81 × 10 ⁴	0.57 × 10 ⁵
	(2.38 × 10 ⁴)	(0.72 × 10 ⁵)	(0.84 × 10 ⁴)	(1.00 × 10 ⁴)	(0.31 × 10 ⁵)
B	1.10 × 10 ⁴	3.32 × 10 ⁵	0.39 × 10 ⁴	0.45 × 10 ⁴	1.66 × 10 ⁵
	(0.69 × 10 ⁴)	(1.80 × 10 ⁵)	(0.25 × 10 ⁴)	(0.26 × 10 ⁴)	(0.81 × 10 ⁵)
C	3.02 × 10 ⁴	1.77 × 10 ⁵	0.35 × 10 ⁴	1.34 × 10 ⁴	0.29 × 10 ⁵
	(1.60 × 10 ⁴)	(0.95 × 10 ⁵)	(0.19 × 10 ⁴)	(0.72 × 10 ⁴)	(0.16 × 10 ⁵)
最大値	4.22 × 10 ⁴	3.32 × 10 ⁵	1.49 × 10 ⁴	1.81 × 10 ⁴	1.66 × 10 ⁵
最大応力 (kg/cm ²)	256	4094	119	145	—

注記：() 外の数値は地震方向がXの場合，() 内はIの場合を示す。

Table 4.5 ポート部台座の断面力と応力値

炉モジュール	地震の方向	Y軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	X軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)
A	X	6.875 × 10 ⁴	2.484 × 10 ⁴	8.05 × 10 ³	514
	I	3.861 × 10 ⁴	1.330 × 10 ⁴	4.53 × 10 ³	514
B	X	1.781 × 10 ⁴	7.220 × 10 ⁴	2.09 × 10 ³	514
	I	1.125 × 10 ⁴	3.913 × 10 ⁴	1.32 × 10 ³	514
C	X	4.906 × 10 ⁴	1.276 × 10 ⁴	5.76 × 10 ³	514
	I	2.599 × 10 ⁴	0.685 × 10 ⁴	3.05 × 10 ³	514
最大値		6.875 × 10 ⁴	7.220 × 10 ⁴	8.05 × 10 ³	514
最大応力 (kg/cm ²)		661	333	57	4

Table 4.6 NBIサポートの断面力と応力値

炉モジュール	地震の方向	Y軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	X軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)
A	X	7.99×10^3	1.61×10^4	5.37×10^3	686
	I	4.47×10^3	0.86×10^4	3.02×10^3	686
B	X	2.06×10^3	4.67×10^4	1.40×10^3	686
	I	1.31×10^3	2.50×10^4	0.88×10^3	686
C	X	5.68×10^3	0.83×10^4	3.85×10^3	686
	I	3.01×10^3	0.44×10^4	2.04×10^3	686
最大値		7.99×10^3	4.67×10^4	5.37×10^3	686
最大応力 (kg/cm ²)		637	95	323	41

固定解析の場合

Table 4.7 本体とポート部との連結部の断面力と応力値

炉モジュール	水平軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	鉛直軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)	振りモーメント (t・m)
A	4.84×10^4	1.50×10^5	1.71×10^4	2.03×10^4	0.65×10^5
	(2.91×10^4)	(0.81×10^5)	(1.00×10^4)	(1.01×10^4)	(0.34×10^5)
B	1.41×10^4	3.72×10^5	0.50×10^4	0.52×10^4	1.85×10^5
	(1.04×10^4)	(2.03×10^5)	(0.37×10^4)	(0.33×10^4)	(1.01×10^5)
C	3.44×10^4	1.98×10^5	0.40×10^4	1.51×10^4	0.33×10^5
	(1.79×10^4)	(1.07×10^5)	(0.21×10^4)	(0.80×10^4)	(0.18×10^5)
最大値	4.84×10^4	3.72×10^5	1.71×10^4	2.03×10^4	1.85×10^5
最大応力 (kg/cm ²)	294	4,587	137	163	—

注記：() 外の数値は地震方向がXの場合、() 内はIの場合を示す。

Table 4.8 ポート部台座の断面力と応力値

炉モジュール	地震の方向	Y軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	X軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)
A	X	7.861×10^4	2.814×10^4	9.23×10^3	514
	I	4.730×10^4	1.498×10^4	5.55×10^3	514
B	X	2.293×10^4	8.050×10^4	2.69×10^3	514
	I	1.683×10^4	4.400×10^4	1.98×10^3	514
C	X	5.594×10^4	1.431×10^4	6.57×10^3	514
	I	2.909×10^4	0.774×10^4	3.42×10^3	514
最大値		7.861×10^4	8.050×10^4	9.23×10^3	514
最大応力 (kg/cm ²)		756	371	65	4

Table 4.9 NBIサポートの断面力と応力値

炉モジュール	地震の方向	Y軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	X軸廻りの曲げ モーメント(t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)
A	X	9.10×10^3	1.82×10^4	6.15×10^3	686
	I	5.48×10^3	0.97×10^4	3.70×10^3	686
B	X	2.65×10^3	5.21×10^4	1.79×10^3	686
	I	1.95×10^3	2.84×10^4	1.32×10^3	686
C	X	6.48×10^3	1.43×10^4	4.38×10^3	686
	I	3.37×10^3	0.50×10^4	2.28×10^3	686
最大値		9.10×10^3	5.21×10^4	6.15×10^3	686
最大応力 (kg/cm ²)		725	106	370	41

Table 4.10 炉モジュール単体系の固有振動数

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)
1	5.72	0.17
2	7.46	0.13
3	23.8	0.042

Table 4.11 炉モジュール単独の場合の断面力 (滑動解析)

	地震方向	曲げモーメント (t・m)	剪断力 (t)	軸力 (t)
本体とポート部 との連結部	X	3.19×10^3	529	440
	Y	5.49×10^3	708	0
ポート部台座	X	3.64×10^3	428	512
	Y	1.74×10^3	700	512
NBIサポート	X	0.42×10^3	285	346
	Y	1.13×10^3	467	346

(5) まとめ

滑動の解析は、耐震的に未解明な点も多く、今後さらに解析的、実験的に検討を加える必要があるが、今回の滑動解析の結果によると、Fig. 4.5のように最大3.45 cmの変位が生じる。ポロイダルコイル円筒部とトロイダルコイルの真空容器は連がっているため、相対変位が3.45 cmも生じると、真空容器の継ぎ部が破壊される。したがって炉本体を載せている台車と、ただ単にウェッジで支えているような支持構造は良くない。台車と地盤とは、基礎ボルトでしっかり固定するような構造にしなければならない。

なお、固定解析による各要素の断面力等は、滑動解析よりも1.1～1.2倍ほど多くなっているが、各部の構造をそれに耐えられる構造に設計しなければならない。また、各要素の中で最も弱い部分は、炉本体とポート部を結ぶ連結部である。今回の解析結果によると、最大応力が4094 kg/cm² (滑動解析)、4587 kg/cm² (固定解析)にもなり、とても許容できる値ではない。重コンの許容曲げ応力は40 kg/cm²なので、2桁もちがうことになる。このままの形状では、とても耐震的強度は得られないので、炉本体の構造を考える場合に、耐震解析を含めた観点からも十分に検討する必要がある。

さらに一次の固有振動数として、炉全体が7.46 Hz、炉モジュール単独の場合が5.72 Hzと求まったが、今後は建屋との連成の問題が考えられるので、基礎地盤と関連して検討すべきである。

4.2 炉の据付方法

4.1項、炉の耐震解析により、炉を固定しなければならないことが確認された。Table 4.8によると、ポート部台座の剪断力は、最大 9230 トンである。

M400のボルトを6本用いると

$$\frac{9230 \times 10^3 \text{ kg}}{\frac{(40 \text{ cm})^2 \pi}{4} \times 6} = 1225 \text{ kg/cm}^2$$

ボルト材質をステンレス鋼とし、さらに地震時は短期荷重と考えることができるから、許容剪断応力を 1500 kg/cm^2 とみなせるので、上記の値は満足する。

また、Table 4.9によりNBIサポートの剪断力は、最大 6150×2 トンである。

M400ボルトを8本用いると、

$$\frac{6150 \times 2 \times 10^3 \text{ kg}}{\frac{(40 \text{ cm})^2 \pi}{4} \times 8} = 1224 \text{ kg/cm}^2$$

この値も許容値以内であるので満足する。

したがって、炉を固定した状態の平面図を Fig. 4.7 に示す。スペース的な問題から、トールス内側の台車については固定できないので、その分台車間のつなぎフレーム（ブラケット）を強固にすることにより、台車全体の剛性を高くしなければならない。

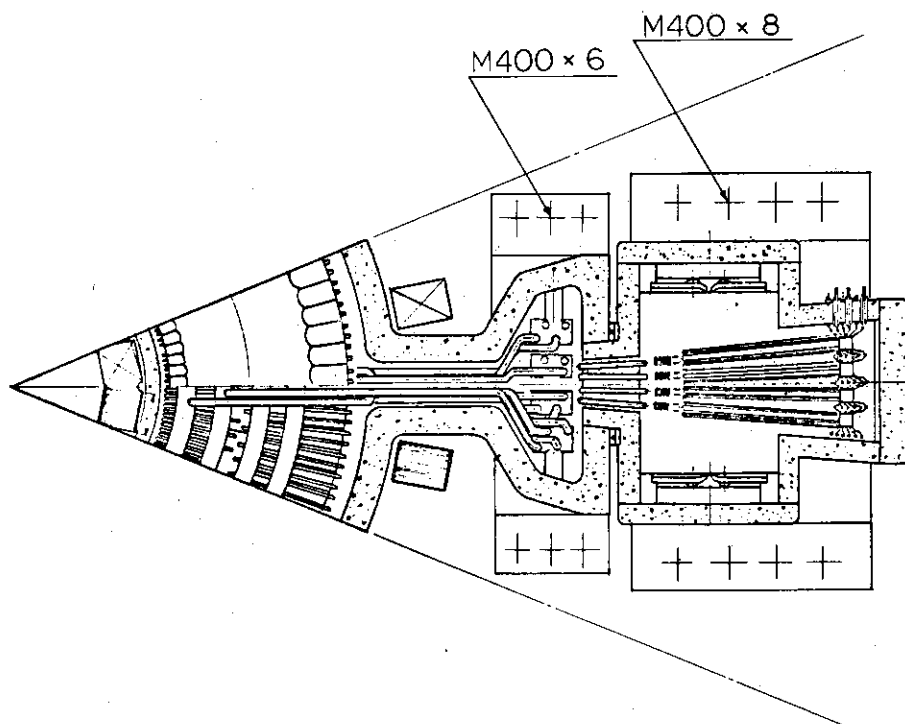


Fig. 4.7 炉の据付概念図

4.3 ブランケット支持固定法

1) 概要

ブランケット支持固定とは、結局ブランケットに作用する力に対する支持脚のことである。作用力としては主に、

- ① 電磁力
- ② 自重

が考えられる。

電磁力としては、2種類考えられている。第1は、磁場の状態に応じて、容器に対する内外圧として作用する力である。これらの電磁力による力は、ブランケット自身で支持するものとする。

自重としては、ブランケット容器自身の重量、フランジ重量、及び配管の重量等が考えられる。

以上のように、電磁力に対してはブランケット容器自身で支持するものとし、ここでは、自重に対する支持方法についての支持脚を検討する。

2) 支持方法

自重を支持する方法としては、被支持物体の下部に支持脚を取り付け支持するのが基本的である。ここでは、支持脚を、ブランケット固定用フランジの下部に取り付け支持する。

炉モジュールの遮蔽壁をこわさずに、ブランケットユニットの搬出装入を行なわなければならない。当然その作業は、炉モジュール側面の開口部より行なうようになる。このことから発生する問題点としては、次のようなものがある。

- ・ 非常に狭いスペースで、主管の切断及び結合を行なわなければならない。
- ・ ブランケットユニットの引き出し時、あるいは、装入時に炉モジュール側に残される主管と支持脚とが干渉する可能性がある。

又、この他に、ブランケット容器の熱変形に対する考慮も払わなければならない。ここでは、次の項目について検討する。

- (i) 搬出装入に対する構造
- (ii) 主管の切断結合に対する構造
- (iii) 支持構造強度

支持方法としては、次の3通りの方法について検討した。

第1案 ; ヘッダーからの主管の分枝点を炉モジュール側面の開口部付近に集める方法。主管内径 ϕ 150 mm, 主管本数 32 本とし、主管切断後ブランケットユニットは、1体で炉モジュール側面片側から搬出する。

第2案 ; 主管の本数を減らし、ヘッダーからの主管の分枝点を炉モジュール中央に集める方法。主管内径 ϕ 200 mm, 主管本数 16 本とする。主管切断後、ブランケットユニットは、炉モジュール側面両側より半分割されたブランケットユニットをそれぞれ搬出する。

第3案 ; 主管の本数を減らし、ヘッダーからの主管の分枝点を炉モジュール側面の開口

部付近に集める方法。主管内径 $\phi 200 \text{ mm}$ 、主管本数 16 本とする。ブランケットユニットの搬出は、第 2 案と同様。

① 第 1 案

(i) 搬出装入に対する構造

Fig. 4.12 に示すように、支持脚と受け台の間に中間板を設けこの中間板を駆動することにより、ブランケットユニットの搬出及び装入を行なう。この動作の際、受け台の上を中間板がすべることになるので、焼き付き防止と潤滑を兼ねて二硫化モリブデンをコーティングする。

炉モジュール側に残される主管と支持脚との干渉の防止は、図に示すように、中間板を 3 分割し、さらに、主管を受け台に埋めることにより行なう。

中間板の位置決めは、中間板の両端近くを受け台にボルト止めすることにより行なう。

(ii) 主管の切断結合に対する構造

溶接継手にしろ、フランジ継手にしろ、主管の切断及び結合作業は支持脚の間で行なわれなければならない。作業を容易にするため、炉モジュール開口部付近の支持脚を 1 部取りはずし可能な構造とする。しかし、スペースとしてはやはり狭く、装置の小型化が要求される。

(iii) 熱変形に対する構造

ブランケット容器が高温となるため、ブランケットユニットが熱変形する。支持脚が中間板の上を滑る構造とし、この熱変形の吸収を行なう。焼き付き防止と潤滑を兼ねて二硫化モリブデンをコーティングする。

ブランケットユニットの位置決めは、ユニット中央部の支持脚を中間板に固定することにより行なう。この作業は、炉モジュールの外で行なうので作業性については問題ない。

(iv) 支持構造強度

(イ) フランジ部強度

前述したように、主管の切断溶接時に支持脚の中央部取りはずしが行なわれるものとし Fig. 4.8 のような支持モデルを考える。

ここで、

$$R = 3000 \text{ mm}$$

$$\alpha = 15^\circ$$

$$w = \frac{250 \times 10^3}{12} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2\pi R}$$

$$= 0.55 \text{ kg/mm}$$

$$W = \pi R \times w$$

$$= \pi \times 3 \times 10^3 \times 0.55 = 5.2 \times 10^3 \text{ kg}$$

となる。

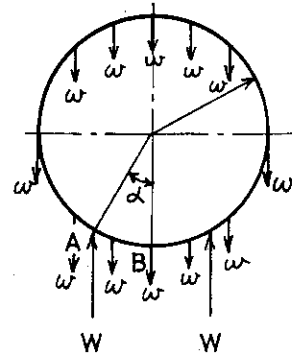


Fig. 4.8 支持モデル

B点の曲げモーメントは¹⁾

$$\begin{aligned}
 M_B &= -wR^2 \left\{ \frac{1}{2} + \cos \alpha - (\pi - \alpha - \sin \alpha) \sin \alpha \right\} \\
 &= -0.55 \times 3^2 \times 10^6 \left\{ \frac{1}{2} + \cos 15^\circ - (\pi - 0.2618 - \sin 15^\circ) \sin 15^\circ \right\} \\
 &= -3.9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

A点の曲げモーメントは¹⁾

$$\begin{aligned}
 M_A &= M_B + wR^2 \times \left\{ (\sin^2 \alpha + \frac{1}{2}) (1 - \cos \alpha) - \alpha \cdot \sin \alpha \right\} \\
 &= -3.9 \times 10^6 + 0.55 \times 3^2 \times 10^6 \left\{ (\sin^2 15^\circ + \frac{1}{2}) (1 - \cos 15^\circ) \right. \\
 &\quad \left. - 0.2618 \times \sin 15^\circ \right\} \\
 &= -4.1 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

フランジ形状を Fig. 4.9 のようにすると、

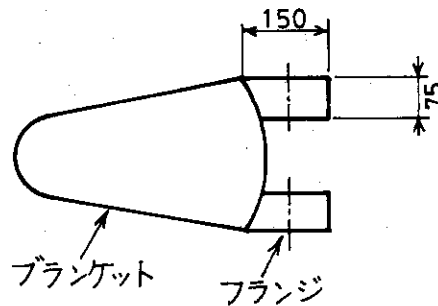


Fig. 4.9 フランジ形状

フランジの断面係数は、

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{1}{6} bh^2 \\
 &= \frac{1}{6} \times 75 \times 150^2 \\
 &= 0.28 \times 10^6 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

したがって、フランジの曲げ応力は、

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{M_B}{Z} \\
 &= \frac{4.1 \times 10^6}{0.28 \times 10^6}
 \end{aligned}$$

$$= 14.6 \text{ kg/mm}^2$$

となる。

許容曲げ応力 15 kg/mm^2 であるので、このフランジは曲げ応力に対して満足する。

(ロ) 支持脚強度

支持脚に働く力は前項で記述したように、

$$W = 5.2 \times 10^3 \text{ kg}$$

である。支持脚の構造は Fig. 4.12 に示す通りである。ここでは簡略化し、幅 75 mm 、長さ 300 mm の断面のみで支持するものとする、圧縮応力 σ_a は、

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{W}{A} \\ &= \frac{5.2 \times 10^3}{75 \times 300} = 0.23 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

となる。したがって、この構造で充分満足する。

② 第 2 案

(i) 搬出装入に対する構造

Fig. 4.13 に示すように、第 1 案と同じく支持脚と受け台の間に中間板を設け、この中間板を駆動することによりプランケットユニットの搬出及び装入を行なう。中間板の位置決めについては、第 1 案と同様である。

プランケット固定用フランジ、ヘッダー、及び中間板等は、左右の半分分割されたプランケットユニット同様、左右それぞれ独立させ、主管切断及び結合以外の作業はできるかぎりふやさない。

(ii) 主管の切断結合に対する構造

第 1 案と同様、取りはずし可能な支持脚を設ける。

しかし、炉モジュール中央部で作業を行なわなければならない、第 1 案に比較し、より小型化、より高精度なマニピュレータ、溶接機等が必要になる。

(iii) 熱変形に対する構造

第 1 案と同様、プランケットユニットの位置決めは、中心最寄りの支持脚を左右それぞれ中間板に固定することにより行なう。

(iv) 支持構造強度

(イ) フランジ部強度

第 1 案と同様の支持モデルを Fig. 4.10 のように考えると、

$$w = 1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}$$

$$W = 10.4 \times 10^3 \text{ kg}$$

A 点の曲げモーメントは、

$$M_A = -7.8 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

B 点の曲げモーメントは、

$$M_B = -8.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

C点の曲げモーメントは、

$$M_C = 5.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

となる。

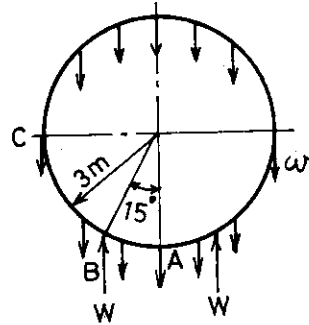


Fig. 4.10 支持モデル

ここでフランジの許容曲げ応力 σ_a を 15 kg/mm^2 とすれば、必要なフランジの断面係数 Z は、

$$\text{A点} : Z_A = \frac{M_A}{\sigma_a} = \frac{7.8 \times 10^6}{15} = 0.52 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\text{B点} : Z_B = \frac{M_B}{\sigma_a} = \frac{8.3 \times 10^6}{15} = 0.55 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\text{C点} : Z_C = \frac{M_C}{\sigma_a} = \frac{5.3 \times 10^6}{15} = 0.35 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

となる。又、フランジ厚さを 75 mm とすればフランジ幅 H は、

$$Z = \frac{1}{6} BH^2$$

$$\therefore H = \sqrt{\frac{6 \times Z}{B}}$$

$$\text{A点} : H_A = \sqrt{\frac{6 \times 0.52 \times 10^6}{75}} = 205 \text{ mm}$$

$$\text{B点} : H_B = \sqrt{\frac{6 \times 0.55 \times 10^6}{75}} = 210 \text{ mm}$$

$$\text{C点} : H_C = \sqrt{\frac{6 \times 0.35 \times 10^6}{75}} = 168 \text{ mm}$$

となる。

(ロ) 支持脚強度

いちばん厳しい個所として、炉モジュール中央最寄りの支持脚につき検討する。ブランケットユニットを半分割で引き抜くため Fig. 4.11 のようなモデルを考える。

ここで,

$$w = \frac{250 \times 10^3}{6 \times 2 \times 800} = 26.03 \text{ kg/mm}$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} \times w \ell^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 26.03 \times 800^2 \\ &= 8.4 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

断面2次モーメント,

$$I = 79.8 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

断面係数,

$$Z = 0.69 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

曲げ応力,

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{8.4 \times 10^6}{0.69 \times 10^6} = 12.2 \text{ kg/mm}^2$$

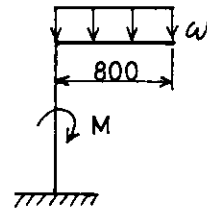


Fig. 4.11 支持脚負荷モデル

したがって、許容曲げ応力 (15 kg/mm²) に対して満足する。

③ 第3案

(i) 搬出装入に対する構造

第2案と同様。

しかし、Fig. 4.14 に示すように、炉モジュール側に残される主管と支持脚との干渉を避けるためには、主管の結合部は、中間板より下の位置でなければならない。

(ii) 主管の切断溶接に対する構造

第1案と同様。

しかし、図に示すように、主管の数は16本となり、第1案に比較して作業性は良くなる。

(iii) 熱変形に対する構造

第1案と同様。

(iv) 支持構造強度

第2案と同様。

2) まとめ

以上3通りの支持方法について検討したが、各々の長所、短所をあげると次のようになる。

第1案

長所 ; 炉モジュール側面の開口部付近で主管の切断及び結合作業を行なうので、第2案に比較して作業性が良い。

短所 ; 主管を支持脚の受け台の下に埋めるため、第2案に比較して、配管に難がある。

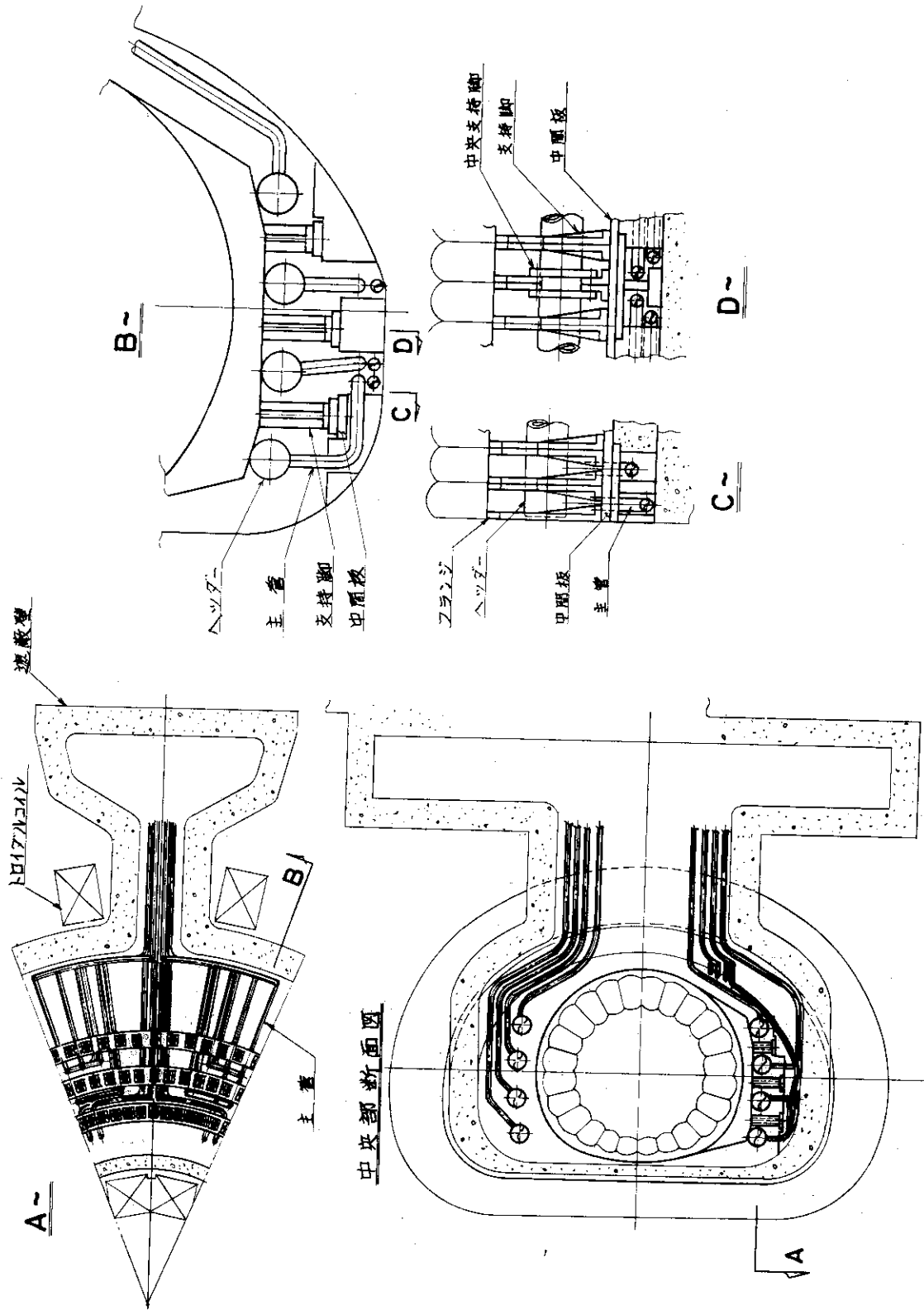


Fig. 4.12 第1案 ブラケット支持脚

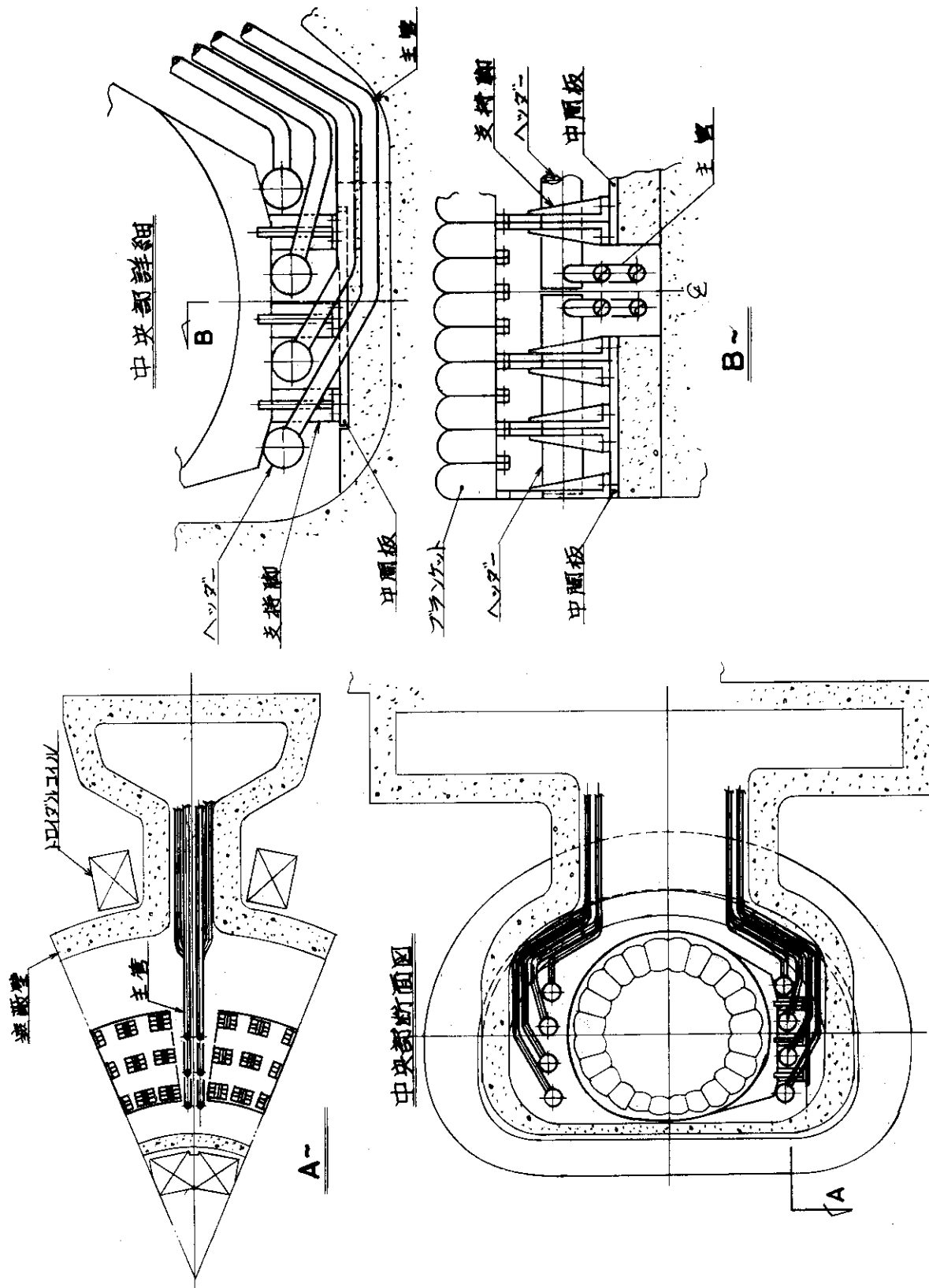


Fig. 4.13 第2案 ブラケット支持脚

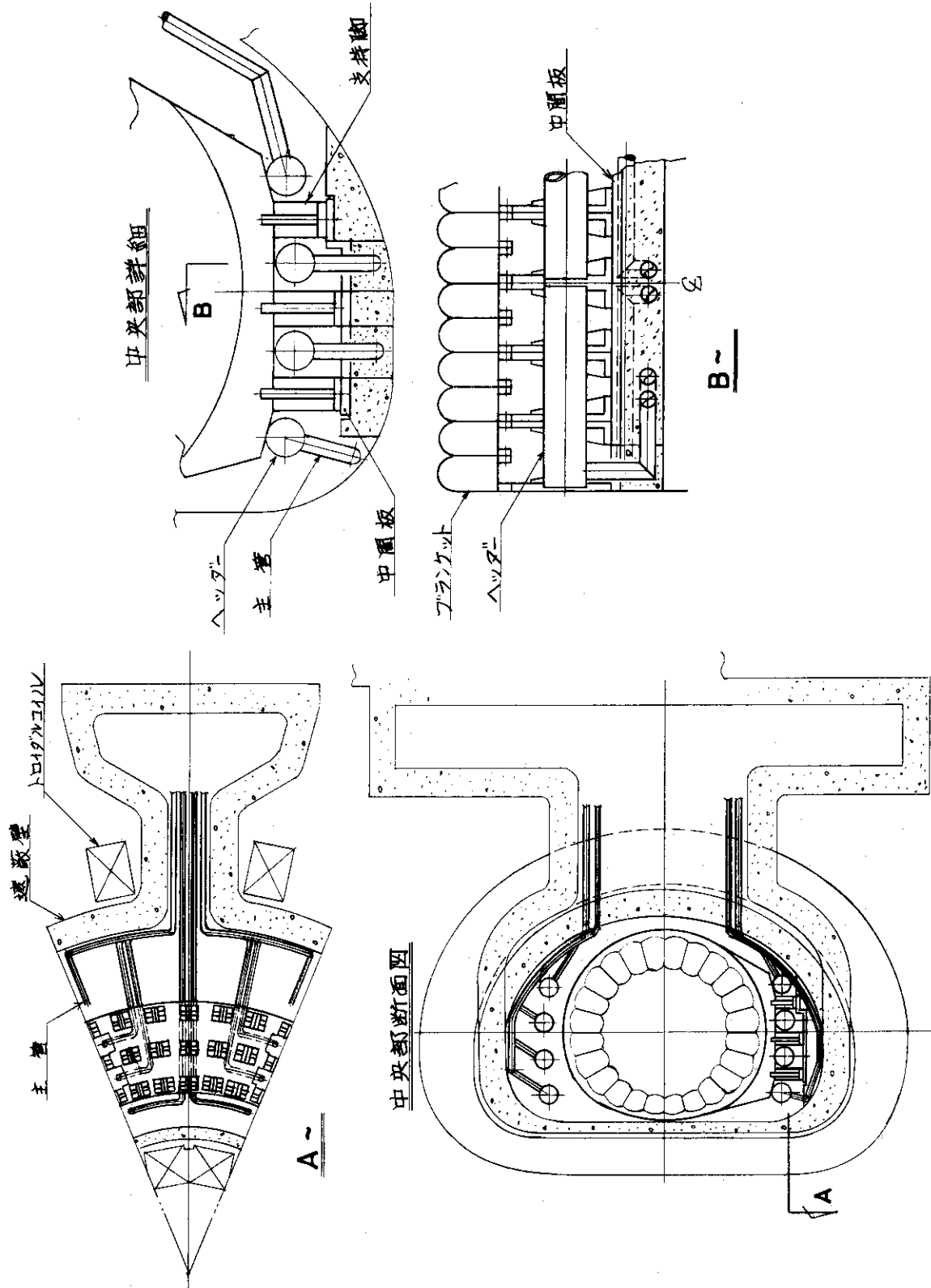


Fig. 4.14 第3案 ブラケット支持脚

第 2 案

長 所 ; 第 1 案, 第 3 案に比較して, 主管の配管が容易である。

第 1 案に比較して, 主管の数を半数にしてあるので, 主管の切断及び結合作業が少なくなる。

短 所 ; 主管の切断及び結合作業を炉モジュール中央で行なわなければならない, 第 1 案, 第 3 案に比較して, その作業が困難になる。

中央部のリング状ブランケットは, 熱膨張に対する対策が新たに検討されなくてはならない。スライドバー方式やインロー方式が考えられるがここでは詳しく触れない。

第 3 案

長 所 ; 炉モジュール側面の開口部付近で主管の切断及び結合作業を行なうので, 第 2 案に比較してその作業性が良い。

又, 主管の本数も少なく, 第 1 案に比較し, 主管の切断及び結合の作業性がよい。

短 所 ; 主管を支持脚下の受け台に埋め込む方法であるので, 第 2 案に比較し, 配管に難がある。

ブランケットユニットの搬出及び装入作業の容易さは, 以上のように主管の切断及び結合作業の容易さによる。前記の長所・短所から, その作業の容易さを判別し, 各々の方法に順位をつけるとすれば次のようになるであろう。

1. 第 3 案
2. 第 1 案
3. 第 2 案

しかし, 将来, 遮蔽壁とブランケットユニットの間隙を縮める可能性があるとするれば, 第 1 案及び第 3 案は配管が困難になり, 第 2 案が最も優利な立場になってくる。すでに述べたように, 第 2 案は, 3 つの方法の中で最も作業性の困難な方法である。したがって, 第 2 案を採用するためには, これらの作業を完全にこなせるような, 切断機, 溶接機及びマニピュレータ等の開発が必要になるであろう。

参考文献

- 1) 強度設計データーハンドブック 裳華房

4.4 ブランケット結合機構とその処理

4.4.1 ブランケット冷却配管

ブランケットを冷却し、核融合反応の熱エネルギーを回収する媒体としてヘリウムガスが用いられる。

入側配管は 300 °C、出側配管は 500 °C、配管内圧力は 10 気圧である。原研で設計したブランケット冷却配管は、Fig. 1.2 に示されている。しかし、分解修理の面からみたブランケット冷却配管ルートは、4.2 項、ブランケット支持固定方法で述べているように 3 通りあり、結局は第 2 案を採用することにした。

その冷却配管図並びに継手部の位置を Fig. 4.16 に示す。主管の本数は、1 モジュール当り上側 8 本、下側 8 本、計 16 本あり、解体、組立時の作業性から、互いに充分な間隔をとることが必要である。この主管に対して与えられている条件は、内径 200 mm である。管の肉厚に関する式は下記の如くである。(Fig. 4.15)

$$\frac{P}{S} = \frac{2t}{D} \quad \dots\dots\dots \text{Barlow の式}$$

- P : 管内圧力
 S : 使用温度における材料の許容引張応力
 t : 管の肉厚
 D : 管の内径

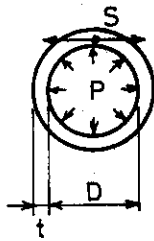


Fig. 4.15 管断面図

厚さ t が内半径 $\frac{D}{2}$ の $\frac{1}{10}$ 以下の円筒は、薄肉として取り扱っても良いのでこの式を採用する。材質としては、ここでは高温用のステンレス鋼々管、SUS 304 TP を想定する。(モリブデン合金などの他の高温用材料となる可能性もあるが、加工性、溶接性のデータがないので考慮しない)

500 °C における配管用ステンレス鋼々管 (SUS 304 TP) の許容引張応力は、 $S = 5.9 \sim 9.5 \text{ kg/mm}^2$ である。¹⁾ $S = 5.9$ を採用すると、Barlow の式より $t = 1.7 \text{ mm}$ となる。

現在、鉄鋼メーカーで生産しているこの内径サイズ付近では、肉厚 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, ……等がある。

核融合のような規格のないものについては、安全率を多く見込んだ方が良く、高温ヘリウムガス腐食のようなデータ不足の現象もあるため、今後、肉厚を決定するためには、詳細な検討が必要である。

ところで、ブランケットユニットを炉ユニットから取り出す場合、主管切り離し箇所をどのような継手にするか、非常に重要な問題である。溶接継手、フランジ継手、どちらの継手を採用するにしても、

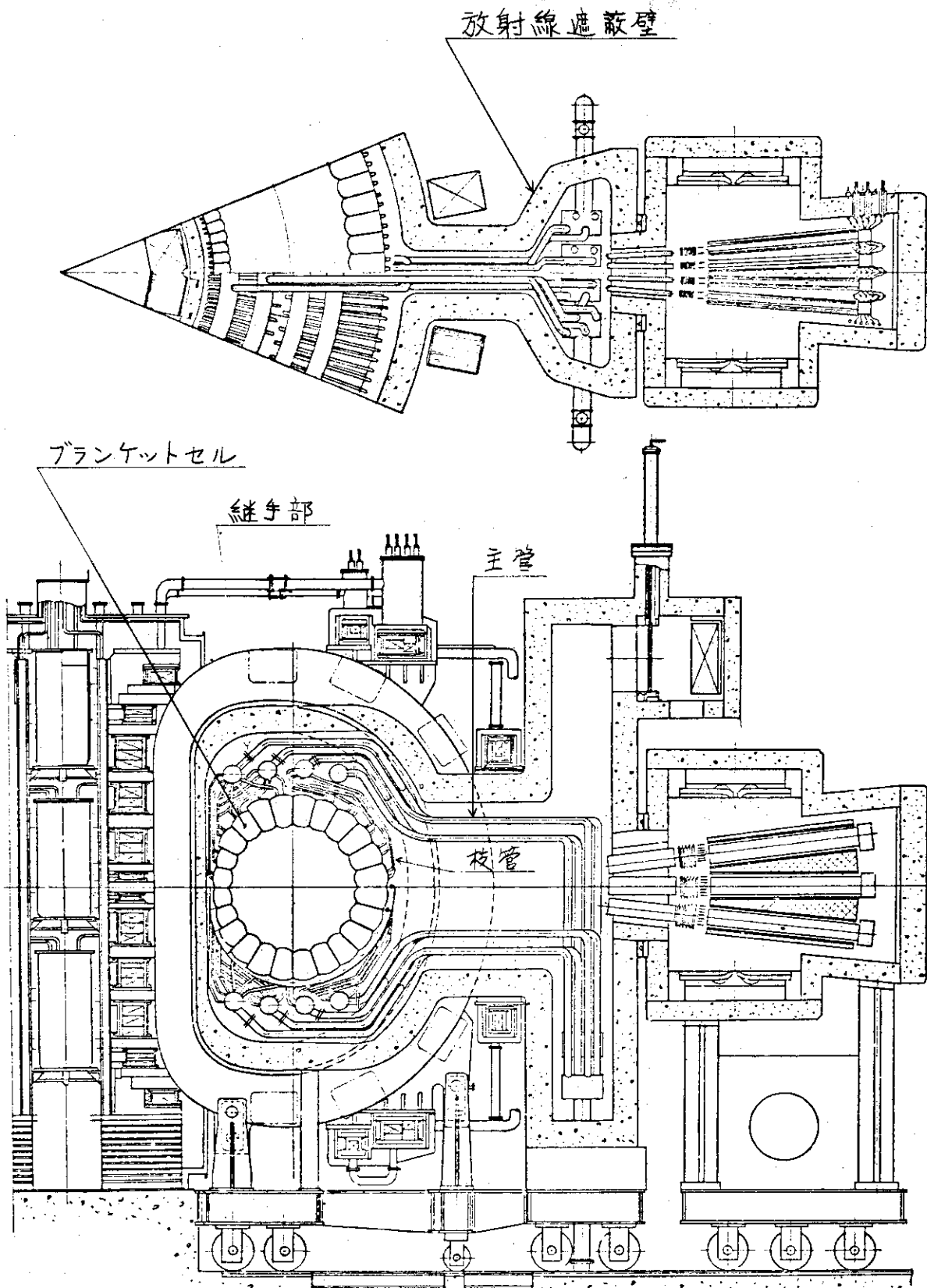


Fig. 4.16 ブランケット冷却配管図

- ① 作業空間
- ② 遠隔操作によるマニピュレータを用いた脱着方法
- ③ 管軸，管端面の合わせ易い構造
- ④ 組立（溶接）後の検査方法と装置

が重要な項目であり，問題点でもある。

以下，2つの継手について検討を行なう。

4.4.2 フランジ継手

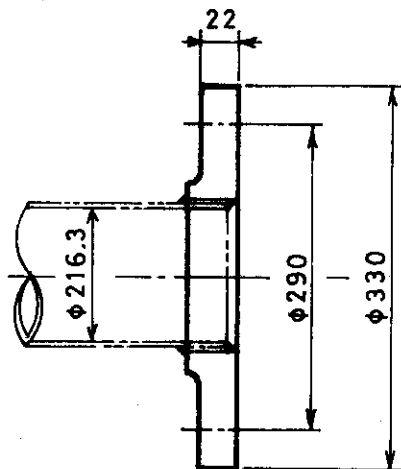
一般にフランジ継手を使用する場合は，シール機構としてガスケットが使われる。高温高圧には，メタルガスケットが用いられるが，近年はメタルOリングの使用実績が増え，種々の使用条件に対し，Table 4.12のようにOリングの選択基準が与えられている。

この表，並びに超高真空装置の最近の使用実績などから判断して，高真空中に存在し，かつ $300^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ （内圧 10 気圧）のヘリウムガスを流す配管に採用することは可能と思われる。しかしながら本核融合炉の場合，

- ① 2 mg/s （標準状態換算で 10 atm cc/s ）のヘリウムリークによって炉の運転が停止する。
- ② 不良管にプラグして殺し，そのまま運転するような使い方ができない。
- ③ 保守交換は，長期の炉の停止を伴う。
- ④ γ 線，中性子照射がある。
- ⑤ 熱サイクルがある。

など，一般の場合に比べて，格段に厳しい使用条件があり，長期間にわたる高信頼性が要求される。

JIS規格に準じて，必要なフランジの大きさを見積もると，大略，Fig. 4.17のようになる。



締付ボルト M20×12本
 JIS B2222
 10 kg/cm^2 鋼管サシ込み溶接フランジ

Fig. 4.17 フランジ寸法

このJISのフランジ使用条件は， 300°C 以下の蒸気，空気，ガス，油，または脈動水である。

それに対して今回の使用条件としては， 500°C のHeガス（内圧 10 kg/cm^2 ）が流れ，管

の外側は 10^{-8} Torr 程度の高真空状態であるから、同じ外径寸法のフランジが使えるかどうか判断しにくい。一応、今後取合検討を進める上では、Fig. 4.17 程度のフランジを考えるものとする。メタルOリングが当る面は、表面粗さ 1.6 以上が要求される。また、一度締め付けをゆるめると当りの状態が悪くなるので注意を要する。本来は、平面座フランジと溝付フランジのペアを用いるが、研磨の仕易さ、リング設定の容易さなどから、Oリング溝を特別に切らず、平面座フランジリテーナプレート方式で行なうものとする。

Oリングとして、中空金属Oリングと弾性コア内蔵の金属Oリングについて紹介する。

(1) 中空Oリング

中空金属Oリングは、ステンレス鋼やインコネル、インコネルXなどの金属チューブをリング状に溶接したもので、シール効果をより一層良くするために、それらの金属表面に軟質銀メッキまたは銅メッキなどを施したものもある。

ゴム製Oリングのように溝に入れて、適当なつぶし代を与えて使用するスクィーズ形ガスケットで、ゴム材質では耐えられないような高温、低温あるいは高圧超高真空のような過酷な使用条件のもとで用いられるエンジン、射出成形機、真空装置、原子炉などに使用されている。したがって、核融合炉の場合にも使用できると考えられる。

真空金属Oリングの基本形として、Fig. 4.18のような種類がある。

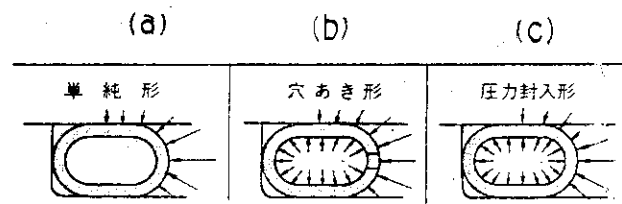


Fig. 4.18 中空金属Oリングの種類

(a)の単純形は、金属チューブをリング状に溶接したもので、中空となっているために弾性が大きく締付圧が小さくすむ。しかし、高圧と高温が同時に作用すると、異常変形を起こしてシール性が劣化するので、一般には 70 kg/cm^2 以下の圧力範囲で用いた方がよい。

(b)の穴あき形は、最も広く用いられるもので、Oリングの内径側（内圧をシールする場合）または外径側（外圧をシールする場合）に直径約 0.5 mm 程度の小孔をあけたもので、この小孔に導入された流体によって接触圧が維持できるため、 $70 \text{ kg/cm}^2 \sim 3000 \text{ kg/cm}^2$ 程度までの高圧に適用される。

(c)はOリングの中空部に窒素ガスのような不活性ガスを封入したもので、 70 kg/cm^2 以上の圧力下で 400°C 以上の高温に適用される。即ち、高温では金属材料が軟化して耐圧強度が低下するので、中空部に封入した気体の熱膨張によってOリングの形状及び弾性力を保持し、シール性能を確保することができる。封入気体の圧力は、使用温度によって異なる

が、従来は一般に 35 kg/cm^2 , 70 kg/cm^2 , 105 kg/cm^2 などがある。

中空金属のOリングは、使用媒体の粘度、圧力、温度などによってチューブの厚さや材質が選択され、その基準を Table 4.12 に示す。²⁾

今回の使用条件を考慮すると、(a)の単純形で充分ではないかと判断できる。しかし、溶接継手と同等の信頼性が要求されるので、軽水炉や高速炉と同様に 10^{-6} atm cc/s ケ所の He 漏洩基準に合格しなければならないであろう。その意味から、前述した中空金属表面に銀メッキを施したものが非常に有効である。

(2) 弾性コア内蔵の金属Oリング

また中空Oリングとは異なり弾性コア内蔵の金属Oリングがある。

主な特徴として、以下のことがあげられる。

- $10^{-9} \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec}$ ヘリウム ($1.32 \times 10^{-9} \text{ atm cc/sec}$) より高度の気密を保持できる。
- 使用温度範囲は、 $-258 \text{ }^\circ\text{C} \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ である。
- シール環の直径は、 $4 \text{ mm} \sim 8000 \text{ mm}$ である。
- 断面円管の直径は、 $1.6 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$ である。
- 形状については何の制限もない。
- 鉛、インジウム、アルミニウム、銅、金、銀、軟鉄、ニッケル、ステンレス鋼、インコネル、ニオブウム、チタン、白金、などあらゆる材料で製造可能。

中空金属Oリングとの大きな違いは、非常に延性の高いダクチルな被覆が、フランジの気密面の表面と各コイルが互いに近接した螺旋発条からなる弾性コアとの間に挟まれて、この被覆が塑性変形を起こし密着する点である。

このOリングも中空金属Oリングと同様に、長期間信頼のもてるシール性能が要求される。

(3) フランジ継手の概略構造

したがって以上の条件を考慮した結果、Fig. 4.19 の如く金属Oリングを用いたフランジ継手部の概略構造を示す。

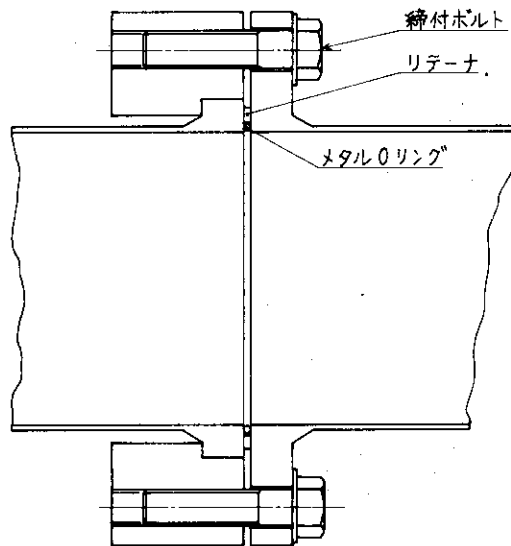


Fig. 4.19 フランジ継手の概念図

Table 4.12 中空金属O-リングの選択基準

媒体		温度 (°C)	相手面の仕上げ	管厚 (インチ)
媒体	真空・ガス・冷媒・揮発性液体等低粘度の流体		1.6 S	0.012 ~ 0.035
	70 kg/cm ² 以上			
	70 kg/cm ² 未満			
	70 kg/cm ² 以上			
および	油圧用 作動油など 中粘度の液体		3.2 S	0.010
	70 kg/cm ² 以上			
圧力	潤滑油、比重の高い油圧用 作動油、タール、ポリマなど 粘度の高い液体		3.2 S	0.006
	70 kg/cm ² 以上			
	腐食性のガス・液体			
グラウンド部の材料			相手金具面の切削加工路はO-リングと同心円にすること。	

(注) 上表の管厚の値は圧力媒体に対する選択標準である。しかし同一圧力媒体においては作用圧が高くなるにしたがって管厚の厚いものが使用されなければならない。

4.4.3 溶接継手

継手部が溶接式の場合も、ブランケットを放射線遮蔽壁の横から外へ取り出す時、Fig.4.16に示した同じ位置で切断及び溶接を行なうことになる。

その方法としては、機械的な切断と熱的な溶断が考えられる。切断時、両方式とも、切断代が必要となるが、新しくブランケットを組み込むためにその部分を再溶接する場合には、短くなった分を何らかの方法で補う必要がある。そのためには、切断箇所の選定に注意し、管の継ぎ足しが容易にできるよう配慮しなければならない。組立時の接合については、突合せ溶接を考える。

溶接継手の品質を確保するためのチェックポイントを列挙すると、

- (a) 適正な設計（材料、寸法、継手形状）がなされているか。
- (b) 適正な溶接施行法が採用されているか。
- (c) 溶接前工程の品質、すなわち取付けおよび開先精度が確保されているか。
- (d) 検査は完全か。

などがあげられる。

以下、この項では、ブランケットの解体、再組立に伴う溶接継手の場合の工程、切断、開先加工、溶接、配管内清掃、溶接検査について述べる。

(1) 工程

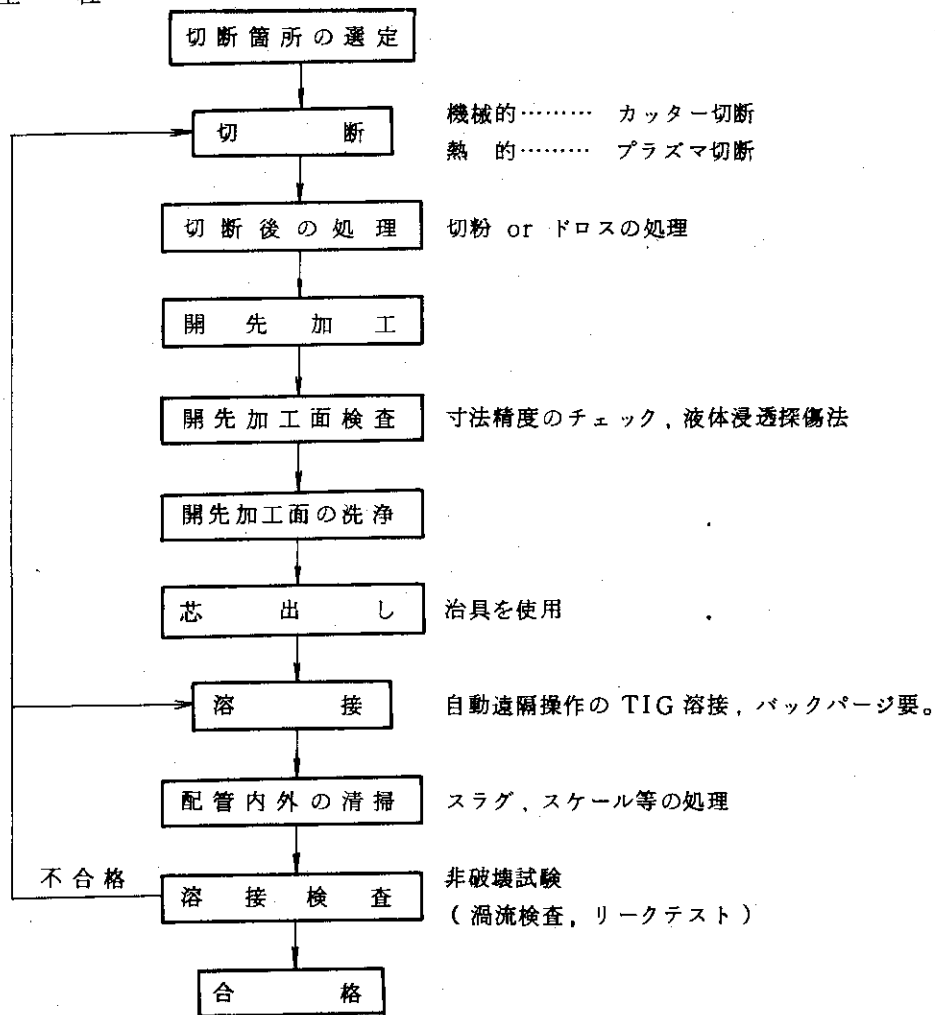


Fig. 4.20 ブランケット冷却配管の切断及び溶接工程図

(2) 切 断

ブランケット冷却配管の切断を考える場合、機械的なカッターによる方法と熱切断(溶断)がある。

(i) カッター切断

ここで切断する配管の材質は、高温用のステンレス鋼管であり、SUS 304 TPを想定している。

オーステナイト系ステンレス鋼は、加工硬化性が強く、熱伝導率も低炭素鋼と比較して1/3程度である。したがって難削性である。

カッターの材質としては、一般に高速度鋼や超硬があり、超硬についてはドライで使用されることが多い。難削性であるなら、本来は切削油が必要であるが、本ケースでは、切削油を使うシステムはまず無理である。したがって超硬カッターによる切断が適している。

しかし、後述する熱切断の項でも問題となっているが、切断時に生じた切り粉の処理、切断するパイプ群とカッターとの取合、自動遠隔操作によるマニピュレータが果たして電動のカッターをうまく使いこなしてパイプを切断することが可能かどうか、など詳細な検討が今後必要となる。

(ii) プラズマ切断法

機械的な力を用いず熱エネルギーにより金属を局部的に溶融して切断を行なう方法を熱切断と呼ぶ。

種類としては、ガス切断、パウダ切断、炭素アーク切断、金属アーク切断、アークエア切断、ミグアーク切断、プラズマ切断、酸素アーク切断、レーザー切断、電子ビーム切断、超音波切断、放電切断などがあげられるが、この章で想定するような使用条件にあてはまる最も適した方法は、プラズマ切断であろう。

プラズマ切断にはプラズマジェット形とプラズマアーク形があり、前者は被切断機にプラズマジェットを直接吹きつけて、被切断材を溶融飛散させることにより切断する。従ってこの方法では、被切断材が導電性、非導電性のいずれでも良い。後者は被切断材にアークを点じる必要があるので、必ず導電性であることを要する。

プラズマ切断はステンレス鋼、アルミニウム合金、銅合金など従来ガス切断ができず、機械切断に頼っていた材料の切断に対して非常に有効で、この分野で大巾に採用されている。そのうえ造船界ではプラズマ塔載のNC切断機が使われ始めている。

しかし、一方、プラズマ切断を行なうとプラズマの高温のために一酸化窒素、二酸化窒素、オゾン、一酸化炭素、ヒュームなどの有害ガスが発生するので、その除去に対しては充分注意しなければならない。とは言ってもトリチウムの取扱いに比べればはるかに容易と考えられる。

Fig. 4.21 にプラズマ切断装置の接続回路図の1例を示す。³⁾ 実際に修理室で、故障した炉モジュールの中のブランケットを取り出すために、プラズマ切断をする場合、このようなプラズマ切断装置を近くに置き、水冷ケーブル、ガス供給ケーブル、および電線を長く延長しておき、自動遠隔操作によるマニピュレータがトーチを持って切断を行なう。

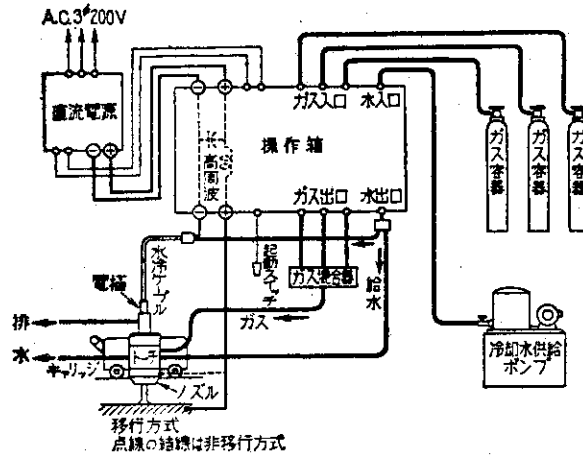


Fig. 4.21 プラズマ切断装置接続回路図

プラズマ切断における問題点として、

- (イ) 発生した有害ガスの処理
 - (ロ) 切断時に生じるドロスの処理
 - (ハ) 切断面の品質
 - (ニ) 切断部の材質変化
 - (ホ) 割れの防止
 - (ヘ) 切断時のパイプ間とトーチとの取合い。
 - (ト) 遠隔自動操作性
- などが挙げられる。

(イ)については、有害ガスを排気する設備があるが、これは従来技術で解決できる。

(ロ)は、ドロスを処理処分するための何らかの装置が必要である。今回のケースのように独特な環境の下で行なえるシステムがいる。

(ハ)～(ホ)については、切断に対する最高の条件を設定することにより解決できるであろうし、切断後の開先加工で修正する方法も可能である。

(ヘ)というのは、トーチをつかむマニピュレータの大きさや自由度とパイプ間のすき間との取合問題をさすわけだが、コンパクトでかつ、高性能のマニピュレータを開発することによって解決されよう。

(ト)は(ヘ)との関連で最も難しい分野であるが、マニピュレータの開発と併行して進歩するであろう。

(3) 開先加工

配管の溶接は、普通、管の外側からの片側溶接にかぎられ、しかも後から初層部の溶接補修はきかないので、完全な初層溶接が要求される。

良好な初層溶接を行なうためには、安定した溶接施行法を用いることが必要であるが、精度の良い開先を準備することは、そのためのきわめて重要な条件の1つである。このために、原子力関係の配管においては、開先加工を機械加工で行なうことが多い。

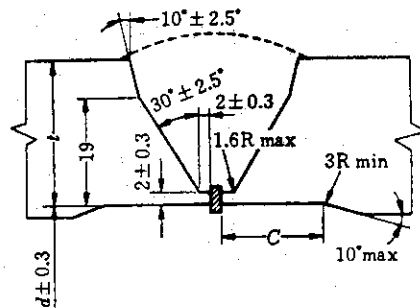


Fig. 4.22 フラットインサート付き継手

Fig. 4.22は原子力配管に用いられる主な開先形状とその加工寸法精度の1例である。図は主要配管系の突合せ溶接に用いられるフラットインサートリング付き継手のものである⁶⁾。しかし、今回の溶接継手においては、管の肉厚が非常にうすいため、Fig. 4.22のような開先加工とは異なりI型となるであろう。従ってフラットインサートリングを使うこともできないし、溶接も一層だけとなる可能性が多い。I型の開先加工はグライダーで行なわれる。

開先加工部の検査は通常、寸法検査と液体浸透探傷検査が行なわれるが今回の場合はI型開先であるため、液体浸透法だけで良いであろう。

なお、特にオーステナイト系ステンレス鋼管の場合だと、応力腐食割れを防止するために、塩素、フッ素などのハロゲン元素やいおう含有量の少ない液剤を使用する必要がある。

それから、溶接前には開先部を清浄にする必要がある。開先部が錆、ちり、ほこり、油脂分などで汚れたまま溶接すると、割れやブローホールなどの溶接欠陥発生の要因となるので、十分に除去し清浄にしなければならない。

また、開先合せのときには、芯出しを正確に行なうために治具が必要になるであろう。

(4) 溶 接

溶接に関しては、3.5項、自動溶接機の中の(1)パイプ自動溶接機の項で詳しく述べているので説明を省く。

(5) 配管内の清浄

一般に継手を溶接したあと、人工法、水洗清浄法、エアブロー法、スチームブロー法、酸洗法などで管内をクリーンにする。

しかし今回のケースでは、Fig. 4.16にみられる如く片側が盲になっており、ブランケットセル内には、 Li_2O Pebble, Li_2O Block, W-Alloy Block, Stainless Steel Block が詰まっているため、水分を嫌ったりそれらのすきまに異物をはさまりやすいので、どの方法も使うことができない。最も良いのは、最高の条件の下で溶接を行ない、後処理の全くいらぬ方法が理想的なのだが、これは現実的には無理であろう。溶接時のスラグとともに、開先加工時の切り粉なども管内に入る可能性が大きい。

そこで従来の技術の中で、何か応用できるものがないかを調べた。焼き曲げ加工を行なった鋼管の曲がり部内面に残ったヒートスケールの清浄、除去に有効な方法として、パイプク

リーナ方式がある。このパイプクリーナは、電動機からフレキシブルシャフトで動力を伝え、フレキシブルシャフトの先端に取り付けた遠心カッターを管内部へ挿入し、遠心カッターを高速で回転させ、管内面のスケール付着面をハンマリングして、スケールを剥離させる方法である。⁴⁾

この方式を今回の場合に応用し、Fig. 4.16 に示されている主管の右端からこの装置を挿入し、スケール等を管壁から剥離させ、そのあと集塵機のようなもので吸い込むようにすれば、十分に配管内を清浄できるのではないかと思われる。

しかしこの方法も、実際に行なってみないことには、清浄効果がどの程度あるのか不明である。

(6) 溶接検査

一般に溶接部の欠陥には、溶接部表面に開口あるいは発生するものと、内部に存在するものがある。

非破壊検査には、3.6項で述べている如く、それぞれの欠陥検出の能力に差がある。また、多種多様な欠陥が発生する溶接部に対し、1つの方法ですべての欠陥について十分満足できる方法は、現在のところない。

したがって、このケースにおける配管溶接継手部の検査としては、放射線透過法が使用できないので、渦流検査、超音波検査、電気抵抗法（現在のところ渦流検査が最も可能性が高いと思われるが……）を併用し、最終的には、ヘリウム加圧法によるリークテストを行なうのが良い。

配管のような場合には、アークの始点および終点などの継ぎ目に裏波の欠陥が発生しやすいので、その部分を注意深く検査する必要がある。

各検査法についての詳しい説明は、3.6項で述べているので割愛する。

4.4.1 まとめ

今まで検討してきた通り、フランジ継手、溶接継手どちらの方法を採用するにしても、長所・短所がある。

Table 4.13 は両者を比較したものである。

Table 4.13 フランジ継手と溶接継手の長所・短所

	フランジ継手	溶接継手
継手部のシール性	○	○
シールに対する長期的な信頼度	△	○
解体および組立の容易さ	○	×

[○ …… 良い △ …… 普通 × …… 悪い]

ブランケットを放射線遮蔽壁の横から外へ取り出すことが要求される解体・組立の頻度が、10年に2～3回程度という少ないものであるとすれば、長期的な信頼性が最も重要である。しかし現在稼動している原子力発電所のように、予期しない故障のために解体・組立頻度が極端に多くなる可能性も考えられる。したがってメンテナンスの容易さからいって、フランジ継手を採用する方が良いと判断される。

実験炉が実際に建設される数十年後までには、フランジ継手のシール性能もさらに良くなると推測される。

現在、原子力関係では、安全性を最優先している。その点、溶接継手の方が優っているが、それに伴う一連のシステムが確立されない限り溶接継手の可能性は薄い。つまり、Fig. 4.20のフローチャートの中にある1つ1つの作業がすべて確実に行なわれた場合にのみ、すぐれた溶接継手が得られるのである。

この継手問題は、炉の運転に直接関係する非常に重大な課題であり、今後、さらに詳細な検討が望まれる。

参考文献

- 1) JIS B 8243 - 1977 圧力容器の構造
- 2) 「機械設計」 Vol. 17 No. 3 MAR. 1973 日刊工業新聞社
- 3) 「溶接便覧」 溶接学会編 丸善株式会社
- 4) 「配管便覧」 監修 幡野佐一, 成瀬 昶 化学工業社

5. 建家に関する検討

5.1 建屋に関する検討

(1) 遮蔽コンクリートの評価

原研の報告¹⁾では、核融合実験炉の炉室を通常コンクリートで構成される生体遮蔽として検討している。

原電東海発電所²⁾の場合には、乾燥比重 2.27 以上の普通遮蔽コンクリート（所要強度 250 kg/cm²）が使用され、その調合は Table 5.1 のとおりである。

Table 5.1 普通遮蔽コンクリートの仕様

	セメント	細骨材	粗骨材	水	W / C	スランプ	圧縮強度	湿潤比重	乾燥比重
No. 1	kg/m ³ 330	kg/m ³ 645	kg/m ³ 1330	kg/m ³ 143	43.4	cm 7.5	kg/m ² 367	平均 2.44	平均 2.31
No. 2	390	605	1235	kg/m ³ 165	42.3	15.0	386	2.43	2.29

(No. 1 …… 一般用, No. 2 …… 狭い壁用)

動力実験炉（原研）²⁾の場合には、普通コンクリートの圧縮強度 $\sigma_{28} = 225 \text{ kg/cm}^2$ 、比重 2.3 以上となっている。

高温ガス炉³⁾では、4週圧縮強度 σ_{28} を 420 kg/cm^2 として考えている。

また高速実験炉「常陽」⁴⁾の場合には、主として普通コンクリートが用いられ、強度管理と共に比重管理が重要な課題であり、要求される大気中乾燥比重は 2.25 以上、28日の所要圧縮強度は 225 kg/cm^2 である。その配合等は、Table 5.2 に示す。

Table 5.2 配合表

	配 合 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	生比重	圧縮強度 (kg/cm ²)	
	セメント	フライアッシュ	水	砂	砂利	混和剤				7日	28日
構造体および遮蔽構造体①	227	57	139	741	1,188	0,710	12	2.5	2,352	224	318
構造体および遮蔽構造体②	254	64	141	712	1,182	0,731	12	2.5	2,353	257	395
炉回り構造体	306	—	153	708	1,221	0,903	10	1.0	2,388	248	387

①は夏期, 中間期, ②は冬期, 混和剤 ポゾリス No. 5 L およびプラスチック

更に、圧縮強度と引張強度および曲げ強度の間には Table 5.3⁵⁾の関係がある。それらの関係は配合、養生、および材令などによって異なり、同じ配合のコンクリートでも試験結果のバラツキが大きく、広い範囲に分布する。そして構造物から切り取ったコンクリートの曲げ強度と標準供試体による曲げ強度は必ずしも一致しない。Table 5.4 はその1例で、構造物から切り取ったコンクリートの曲げ強度は標準供試体の曲げ強度よりも小さい値になっている。

Table 5.3 圧縮強度と引張強度、曲げ強度の関係

圧縮強度 σ_c kg/cm ²		300	350	400	450	500
引張強度	σ_t kg/cm ²	24 ~ 31	27 ~ 36	30 ~ 40	34 ~ 44	37 ~ 46
	σ_c/σ_t	9.7 ~ 12.5	9.7 ~ 13.0	10.0 ~ 13.3	10.0 ~ 13.3	10.9 ~ 13.5
曲げ強度	σ_b kg/cm ²	35 ~ 55	45 ~ 65	50 ~ 75	55 ~ 85	60 ~ 90
	σ_c/σ_b	3.5 ~ 8.6	5.4 ~ 7.8	5.3 ~ 8.0	5.3 ~ 8.2	5.5 ~ 8.3

Table 5.4 構造物から切り取ったコンクリートの曲げ強度

セメント	単位セメント量 c kg	単位水量 w kg	スランブ cm	空気量 %	圧縮強度 σ_{28} kg/cm ²	曲げ強度 kg/cm ²		
						標準供試体 σ_b (材令28日)	Sawed beam σ'_b (材令70日)	σ'_b/σ_b %
A	277	135	5.0	5.5	268	39.7	35.7	90
	332	145	9.5	5.7	275	41.1	33.8	82
	390	150	6.7	5.1	320	45.8	29.3	64
B	330	146	7.5	6.1	295	36.8	32.7	89

またコンクリートの許容応力度の規準としては、一般に長期圧縮： $\frac{1}{3} F_c$ 、短期圧縮： $\frac{2}{3} F_c$ としている⁶⁾。(F_c: 圧縮強度) 各強度の比較として Table 5.5⁷⁾のようなデータも使用されている。

Table 5.5 各強度の比較

強度親類	比率範囲	常用値
圧縮 (F _c)	100	100
引張 (F _t)	8 ~ 13	10
曲げ (F _b)	(2 ~ 2.5) F _t	15
剪断 (F _s)	~ 20	10

従って今までのデータを参考に Table 5.6 に、今回の核融合実験炉で使用する生体遮蔽用コンクリートの各強度を仮定する。将来はもっと強度的にすぐれた材質のコンクリートが開発され

るであろうが、今回は現在あるものについて検討する。

Table 5.6 各許容応力(遮蔽普通コンクリート)

		圧縮 (kg/cm ²)	引張 (kg/cm ²)	曲げ (kg/cm ²)	剪断 (kg/cm ²)
強度(材令28日)		400	40	60	40
許容応力	長期	133	13.3	20	13.3
	短期	267	26.7	40	26.7

(2) モデル

Fig. 5.16 に示されている如く、核融合炉の炉室は、軽水炉の場合と異なり大きな扉が8箇所ある。そのため、構造的には、Fig. 5.1の如く8本の柱で重量物を支えているようなモデルとみなすことができる。

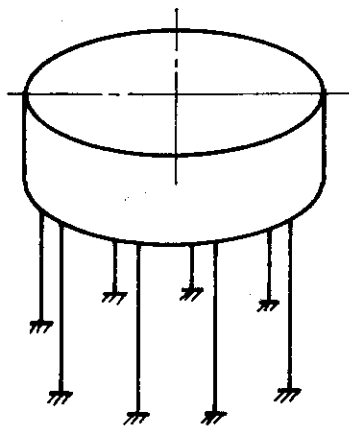


Fig. 5.1 炉室モデル

これを更に単純化し、水平地震力 0.5 G を加えると、Fig. 5.2 のような変形が生じる。

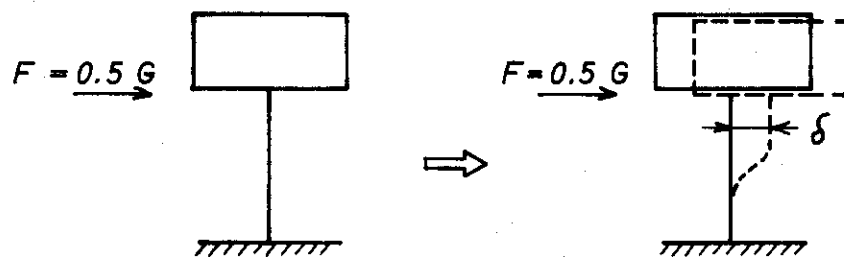


Fig. 5.2 計算モデル

柱全体の断面2次モーメント、および断面係数は、柱1本当りの平均断面2次モーメント、平均断面係数を8倍したものとする。

(3) 炉室の強度

炉室の概略重量は 58,800 t である。

また、8本の柱つまり全体の柱の断面性能は、

$$I = 8 \times \bar{I} = 8 \times 370 = 2960 \text{ m}^4$$

$$Z = 8 \times \bar{Z} = 8 \times 68.1 = 545 \text{ m}^3$$

となる。

したがって、水平地震力に対する柱の強さは、

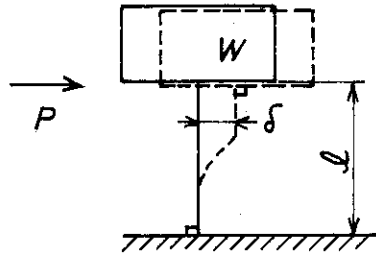


Fig. 5.3 計算モデル

P : 地震による水平荷重 0.5 G

l : 柱の高さ 20 m

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{P l^3}{12 EI} = \frac{58,800,000 \text{ kg} \times 0.5 \times (2000 \text{ cm})^3}{12 \times 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \times 2960 \times 10^8 \text{ cm}^4} \\ &= 0.189 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{6 EI \delta}{l^2} = \frac{6 \times 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \times 2960 \times 10^8 \text{ cm}^4 \times 0.189}{(2000 \text{ cm})^2} \\ &= 53.9 \text{ (kg/cm}^2 \text{)} \end{aligned}$$

である。(Fig. 5.3 参照)

柱の材質は普通遮蔽コンクリートであり、Table 5.4 で定めたように、短期の許容曲げ応力は 40 kg/cm^2 なので炉室の壁厚さ 4 m では強度的にもたないことになる。

従って Fig. 5.27 のように壁厚さを 6 m に訂正した場合の強度計算を以下行う。
壁厚さ 4 m の場合と同様の計算をすると、

$$I = 8 \cdot \bar{I} = 8 \times 590.5 = 4724 \text{ (m}^4 \text{)}$$

$$Z = 8 \cdot \bar{Z} = 8 \times 108.6 = 869 \text{ (m}^3 \text{)}$$

また壁厚を6mとしたことにより炉室重量は増し、65000 t となる。

$$\therefore \delta = \frac{P \ell^3}{12 EI} = \frac{65,000,000 \times 0.5 \times (2000)^3}{12 \times 3.5 \times 10^5 \times 4724 \times 10^8} = 0.131 \text{ (cm)}$$

$$\therefore \sigma_{\max} = \frac{6EI \delta}{Z} = \frac{6 \times 3.5 \times 10^5 \times 4724 \times 10^8 \times 0.131}{(2000)^2 \times 869 \times 10^6} = 37.4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

従って壁厚さ6mとすることにより、曲げ応力を40 kg/cm²以下に抑えることができる。

故に今後は、炉室の壁厚さ等は生体遮蔽の面からだけでなく、耐震強度の面からもっと詳しく検討しなければならない。

一応概念設計の立場としては、以上の計算から当初に比べ厚い壁として考えることにする。

参考文献

- 1) 炉設計研究室 : JAERI - M 7300 (1977)
- 2) 「動力用原子炉と建設工学」(III), 日本原子力産業会議原子動力研究会(1963)
- 3) 「原子力工業」日刊工業新聞社 Vol. 21 No. 7 JUL. (1975)
- 4) 「原子力工業」日刊工業新聞社 Vol. 17 No. 2 FEB. (1971)
- 5) 「プレストレストコンクリートの設計」岡田 清, 神山 一共著 国民科学社刊, 発売元, オーム社書店 昭和43年
- 6) 「建築の構造計算」大庭寿郎著, 理工学社
- 7) 「建築材料」建築総合演習, 石井一夫著, 彰国社刊

5.2 旋回台車軌道の床面強度

旋回台車の床面は下の地下室の天井になっている。旋回台車は炉モジュールを搭載すると16,100 トンの重量になり、床面（地下室の天井）はこの重量に耐えなければならない。地下室には隔壁を Fig. 5.4 のように設けるものとする。

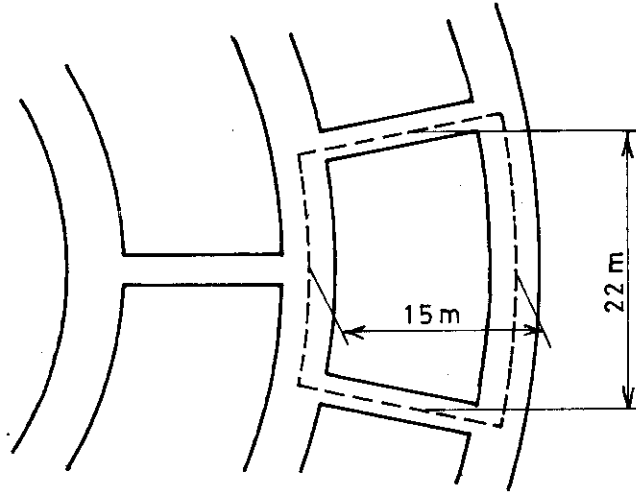


Fig. 5.4 地下室の隔壁

点線部の床面は矩形に近似される。矩形板に等分布荷重が作用するものとして計算する。この場合、矩形板の支持方法が問題になる。実際の支持状態は固定と単純支持の間と考えられるので、2辺が単純支持、他の2辺が固定と想定して計算する。

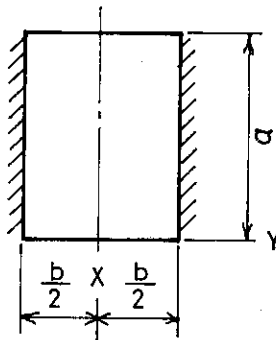


Fig. 5.5 計算モデル

Fig. 5.5 において、最大曲げモーメントは板の中央部に発生し、次式で与えられる¹⁾。

$$M_{\max} = r q a^2$$

但し、 r は a/b により定まる係数 q は分布荷重 $a = 2.2 \times 10^3$ cm, $b = 1.5 \times 10^3$ cm とすると $a/b = 1.46$ から $r = 0.105$ となる。

旋回台車の荷重を受ける面積は 22 m \times 25 m であるので

$$q = \frac{1.63 \times 10^7}{2.2 \times 10^3 \times 2.5 \times 10^3} = 3.0 \text{ kg/cm}^2$$

床面（地下室の天井）の厚さを h とすると曲げ応力は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{6M}{h^2}$$

これより

$$h = \sqrt{\frac{6M}{\sigma_b}} = \sqrt{\frac{67q}{\sigma_b}} \cdot a$$

コンクリートの曲げ許容応力を 20 kg/cm^2 とすると、

$$h = \sqrt{\frac{6 \times 0.105 \times 3.0}{20}} \times 2.2 \times 10^3 = 6.76 \times 10^2 \text{ cm} = 6.76 \text{ m}$$

したがって地下室の天井厚さは約 7 m 必要である。

仕切壁の厚さはコンクリートの許容圧縮応力を 133 kg/cm^2 とすると、計算上は天井の自重を加味しても 40 cm 程度あればよい。しかし、仕切壁は地下室の床面（すなわち、全体の基礎）へ均等に力を伝える役目をするので、バランス上 3 m 程度は必要である。この場合、仕切壁にはかなり大きい連絡通路をあけることができる。

参考文献

- 1) 「板とシエルの理論」チモシエンコ・ヴォアノフスキー・クリーガー共著
長谷川 節訳 ブレイン図書出版株式会社 発売元

5.3 遮蔽扉の設計

(1) 概要

遮蔽扉は非常に重く、その開閉装置も大型にならざるを得ない。又扉が閉じた状態において、それぞれ独立した部屋の雰囲気管理も厳重になされなければならない、扉の気密性も考慮する必要がある。

炉室遮蔽扉は上下に、その他の遮蔽扉は横にスライドさせることによって扉の開閉を行う。したがって、開閉装置としては、炉室遮蔽扉にはウィンチ方式が、その他の遮蔽扉には、油圧方式、車輪方式、ラックピニオン方式等が考えられる。ここでは、次の方式についてそれぞれ検討する。

1. 炉室遮蔽扉……ウィンチ方式
2. 旋回台車上の遮蔽扉……ネジ方式
3. 修理室遮蔽扉……ラックピニオン方式

炉室遮蔽扉は、特に重要と考えられるので詳細に、その他のものは基本的な概念を述べるに留めた。

ここで油圧方式や車輪方式を採用しなかったのは、油圧方式においては、その保守が大がかりとなるためであり、車輪方式においては車輪が故障した場合の修理が困難であると考えたためである。なお、油圧方式については、その他の開閉装置として、その概念を検討した。

(2) 炉室遮蔽扉

① 扉の仕様

(i) 扉の寸法 (Fig. 5.6 参照)

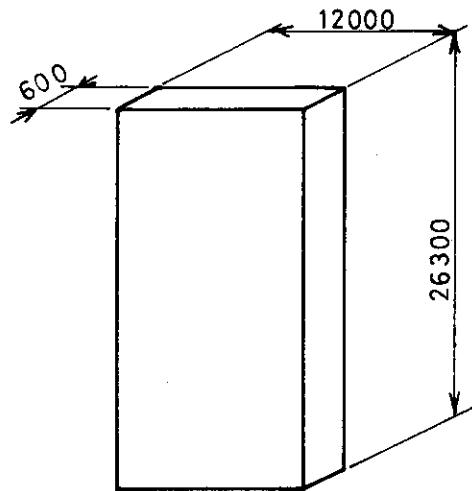


Fig. 5.6 扉寸法

- | | |
|------------|--------------------|
| (ii) 扉の重量 | 約 1,000 t |
| (iii) 扉の材質 | 外枠 …… SUS 板 100 mm |
| | 中味 …… 重コン |
| (iv) 扉の個数 | 8 個 (炉室全体) |

円周ドームを8分割にし、各々単独運動とする。

② 扉昇降用ウィンチ装置

全体図を 1000 t 用扉昇降装置 (Fig. 5.15) に示す。

(i) ウィンチ装置の重量

一式 …… 230 t

扉側に取付ける付属品 …… 35 t

(cf, ロープ車, ブラケット, ガイドローラ etc.)

(ii) 昇降距離 …… 25.3 m

扉の上昇時, 扉下端は搬入口高さまで上昇させる。

(iii) 昇降速度

① 1 個所の扉開閉 (昇降) を 2 時間以内に完了させる。

② 作業効率等を加味して, 25.3 m を 30 分以内で巻上 (下) げるものとする。

$$\text{作業効率} = \frac{30 \text{ 分}}{120 \text{ 分}} \times 100 = 25 \quad \therefore 25 \%$$

残りの 75 % で炉モジュール等の搬出入及び段取りを行う。

$$\text{③ 昇降速度} : v = \frac{25.3 \text{ m}}{30 \text{ min}} = 0.843 \text{ m/min}$$

$\therefore v = 0.9 \text{ m/min}$ に決定する。

$v = 0.9 \text{ m/min}$ で実際に巻上げに要する時間

加速時間を加味し $t = 1688 \text{ sec}$ (28 分 8 秒)

(iv) 昇降用電動機所要出力

① 吊り上げ部分重量 $W = W_1 + W_2 = 1035 \text{ t}$

$$\begin{cases} \text{扉本体} & W_1 = 1000 \text{ t} \\ \text{付属品} & W_2 = 35 \text{ t} \end{cases}$$

② 所要出力

$$N = \frac{W \times v}{6.12 \times \eta} = 211.4 \text{ kW} \quad \begin{cases} W = 1035 \text{ t} \\ v = 0.9 \text{ m/min} \\ \eta = 0.72 \end{cases}$$

電動機を 2 組使用する。

従って 110 kW \times 600 rpm 100 % ED …… 2 台

③ 左右 2 個の電動機の同期回転は, 減速機を連結し, アイドラーギヤにより同期させる。

(V) 昇降用ワイヤーロープ

① 安全率 S.F = 8 以上とする。

② ロープ掛数 64 本掛 4 本巻取り

③ 使用ワイヤーロープ

6 × Fi (29) 繊維芯入り普通 B種 S.Z ヨリ 47.5 φ

⊖ ワイヤロープ安全率 S.F

$$S.F = \frac{\text{ロープ切断荷重}}{\text{吊り上げ荷重}} \times \text{掛数} \quad \text{ロープ切断荷重} = 136 \text{ t}$$

$$= 8.4 > 8$$

⊕ ワイヤロープ取替え時の左右のバランス（ロープの伸び等による緩み具合）は減速機に用いたアイドル部に「クローラッチ」を設け、ロープ調整はこのクローラッチを切替えて、各モータを自由に回転できる構造とする。

(vi) 使用ブレーキ

① 電磁ブレーキ

電動機 1 台に 1 組

（電動機トルクの 150 % 以上）

⊖ 電動油圧押上機

電動機 1 台に 1 組

（電動機トルクの 150 % 以上）

(vii) ガイドローラ

① 長さ方向には 4 ヶ所（片側 2 ヶ所）のガイドローラを設ける。

⊖ 巾方向には Fig. 5.15 の D 断面を見ればわかるように、ガイドローラを取り付けなくとも扉の揺れば防げる。

(viii) 安全装置

扉の最上昇時において、ワイヤロープだけで吊っておくのは安全性の面から好ましくない。スペース的な問題（気密防止用ゴムを取付けているため）からカギフック形式のロック機構が良い。

③ 昇降式扉の気密性

Fig. 5.15 に示しているように、気密を保持するために壁側にゴムを取付け、更に扉下端にゴムを貼付している。炉室内外の差圧は、たかだか数 10 mm Aq であるからこの程度の構造でも十分に満足できると考えられる。

摩擦によるゴムの摩耗寿命に関しては、昇降速度が比較的小さい（0.9 m/min）点と、扉を昇降する頻度が少ない点からあまり問題とはならない。

もし寿命がきて、ゴムの交換が必要になったとしても、他の作業と比べてみて容易に行えるであろう。

(3) 旋回台車上の遮蔽室遮蔽扉

① 扉重量と走行抵抗

扉の外形寸法は、26500 mm × 6000 × 600 でその重量は約 500 トンである。

扉の下面に MoS₂ をコーティングしその上をすべる構造とする。MoS₂ の摩擦係数は、 $\mu = 0.05$ である。この時の走行抵抗 F は、

$$F = \mu \cdot W = 0.05 \times 50 = 25 \text{ ton}$$

となる。起動時の起動抵抗は、 $\mu' = 0.1$ とすると、

$$F' = \mu' \cdot W = 0.1 \times 50 = 50 \text{ ton}$$

となる。

② 駆動機構とモーター所要馬力

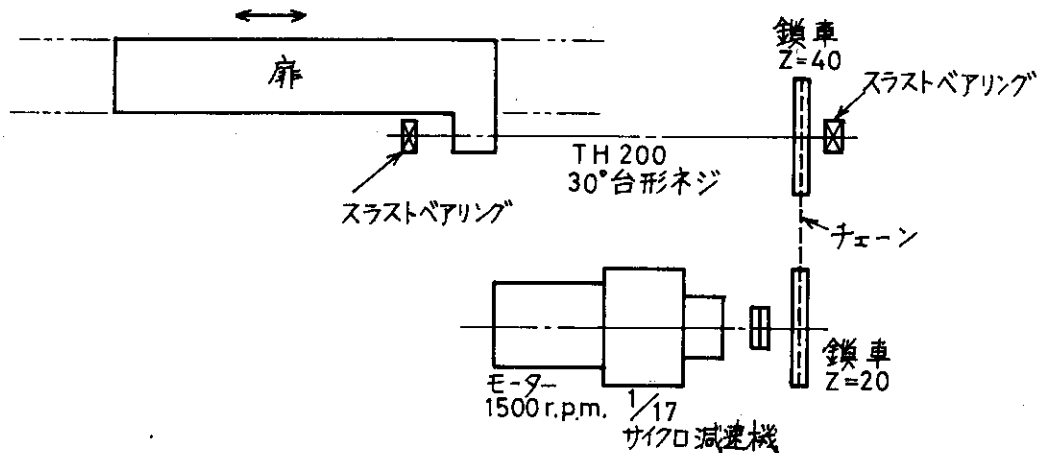


Fig. 5.7 駆動機構

電動機による回転運動を、サイクロ減速機で減速した後チェーンで、TM 200 ボルトを回転させることにより扉の移動を行う機構である。

TM 200 ボルトは、固定されており回転運動のみ行う。扉には TM 200 のメネジを切っておりボルトが回転することによりボルト軸方向の移動を行う。

扉の開閉速度を 1 m/min とすると、モーター所要馬力は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{1}{101.97} \times F \cdot v \cdot \frac{1}{\eta} & \eta : \text{効率 } 0.5 \\
 &= \frac{1}{101.97} \times 25 \times 10^3 \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{0.5} \\
 &= 8.2 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

モーター馬力として、11 kW を選定する。なお、起動時については、モーターのオーバーロードでまかなう。

③ 部品強度

(1) TM 200 30° 台形ネジ

① 座屈

座屈モデルとして Fig. 5.8 を考える座屈荷重は下記の式によって考えられる。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{\ell^2}$$

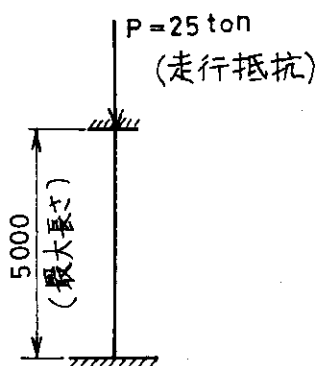


Fig. 5.8 座屈モデル

断面二次モーメント I は、ネジの谷底径が $\phi 179$ mm であるから、

$$I = \frac{\pi}{64} \alpha^4 = \frac{\pi}{64} \times 17.9^4 = 5039 \text{ cm}^4$$

となる。したがって座屈荷重は、

$$\begin{aligned} P_{cr} &= \frac{\pi^2 \times 2.1 \times 10^6 \times 5.039 \times 10^3}{5^2 \times 10^4} \\ &= 4.1 \times 10^5 \text{ kg} \\ &= 410 \text{ ton} \end{aligned}$$

となり十分な強度を持つ。

㊦ フランク面面圧

フランク面面圧は、次式により求められる。

$$q = \frac{P}{\pi \cdot z \cdot h \cdot (d - h)}$$

P : 軸方向荷重 50 ton (起動時)

z : ネジ山かみ合い数

h : ネジ山高さ 10 mm

d : ネジ外径 $\phi 200$ mm

ここで、 $q = 1 \text{ kg/mm}^2$ とすると、

$$\begin{aligned} z &= \frac{P}{\pi \cdot q \cdot h \cdot (d - h)} \\ &= \frac{50 \times 10^3}{\pi \times 1 \times 10 \times (200 - 10)} \end{aligned}$$

$$= 8.4$$

となり、必要なネジ山かみ合い数は9あればよいことになる。ネジ山かみ合い数を15とする。

㊦ 引っ張り応力

軸方向に働く最大荷重は 50 ton である。したがって、引っ張り応力は次のようになる。

$$\sigma = \frac{4 \times P}{\pi d^2} \quad d: \text{ネジ谷径 } \phi 179 \text{ mm}$$

$$= \frac{4 \times 50 \times 10^3}{\pi \times 17.9^2}$$

$$= 198.7 \text{ kg/cm}^2$$

㊧ ボルト自身によるたわみ

モデルとして Fig. 5.9 を考える。

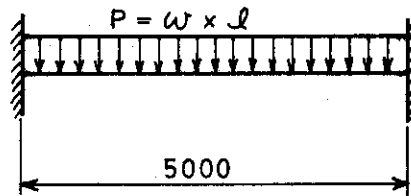


Fig. 5.9 計算モデル

このはりの最大曲げモーメントは、

$$M = \frac{w l^2}{24}$$

となる。ここで、 w は

$$w = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times 8 \times 10^{-3} = 2.3 \text{ kg/cm}$$

となり、最大曲げモーメント M は次のようになる。

$$\begin{aligned} M &= \frac{2.3 \times 5^2 \times 10^4}{24} \\ &= 2.4 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

ネジ谷の断面係数 Z は、

$$Z = \frac{I}{d/2} = \frac{5039}{17.9/2} = 567 \text{ cm}^3$$

となる。曲げ応力は、

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{2.4 \times 10^4}{567} = 42.3 \text{ kg/cm}^2$$

であり、十分な強度を有する。

自重によるたわみ δ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta &= 0.009317 \times \frac{w \cdot \ell^3}{E \cdot I} \\ &= 0.009317 \times \frac{2.3 \times 5^3 \times 10^6}{2.1 \times 10^6 \times 5039} \\ &= 0.25 \times 10^{-3} \text{ cm} \end{aligned}$$

微小たわみである。

(ii) チェーン及び鎖車

TM 200 の 30° 台形ネジを駆動するためチェーン伝動機構を使用する。

一般的に用いられている鎖車とチェーンの設計では、小歯車の最高許容回転数と許容伝動馬力よりそのサイズが決定される。

小鎖車の回転数は、

$$n_s = \frac{1500}{17} = 88.2 \text{ r.p.m}$$

伝動馬力は、8.2 kWである。

チェーンの減速比を2とし、チェーンと鎖車を次のように選定した。

○ ローラチェーン

- チェーン番号 120
- ピッチ 38.10
- ローラ径 22.23

○ 小鎖車

- 歯数 20
- ピッチ径 $\phi 243.55$
- 外径 $\phi 263$

○ 大鎖車

- 歯数 40
- ピッチ径 $\phi 485.60$

・外径 $\phi 507$

鎖車にかかる負荷は、次のようになる。

TM 200を駆動するのに必要なトルク

$$T = F \cdot r \cdot \frac{L + 2\pi r \mu}{2\pi r - L \mu}$$

r ; ネジ山の平均半径 95 mm

L ; ネジのリード 20 mm

μ ; 摩擦係数 0.05

従って、

$$T = 50 \times 10^3 \times 9.5 \times \frac{2.0 + 2\pi \times 9.5 \times 0.05}{2 \cdot \pi \times 9.5 - 2.0 \times 0.05}$$

$$= 39700 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

となる。従って負荷は、次のようになる。

$$P = \frac{39700}{48.56/2} = 1635 \text{ kg}$$

チェーンの破断強度は、チェーン番号 120 の場合 12800 kg である。

安全率 5 とすると、

$$P' = \frac{12800}{5} = 2560 \text{ kg}$$

となり、これを満足する。

④ 気密性

前項で述べた方法と同様に、ゴムにより気密を保つものとする。

(4) 修理室遮蔽扉の設計

① 扉重量と走行抵抗

修理室扉の最大のもは、旋回台車上の遮蔽扉と同等のものであるから、その重量と走行抵抗は次のようになる。

扉の重量 $W = 500 \text{ ton}$

走行抵抗 $F = 25 \text{ ton}$

起動抵抗 $F' = 50 \text{ ton}$

② 駆動機構とモータ所要馬力

Fig. 5.10 に示すように、ラックピニオン方式で扉の開閉を行う。この機構のものを扉 1 つにつき 4 個設ける。

扉開閉速度を 1 m/min とすると、モータ所要馬力は、前項のものと同様合計 8.2 kW となる。

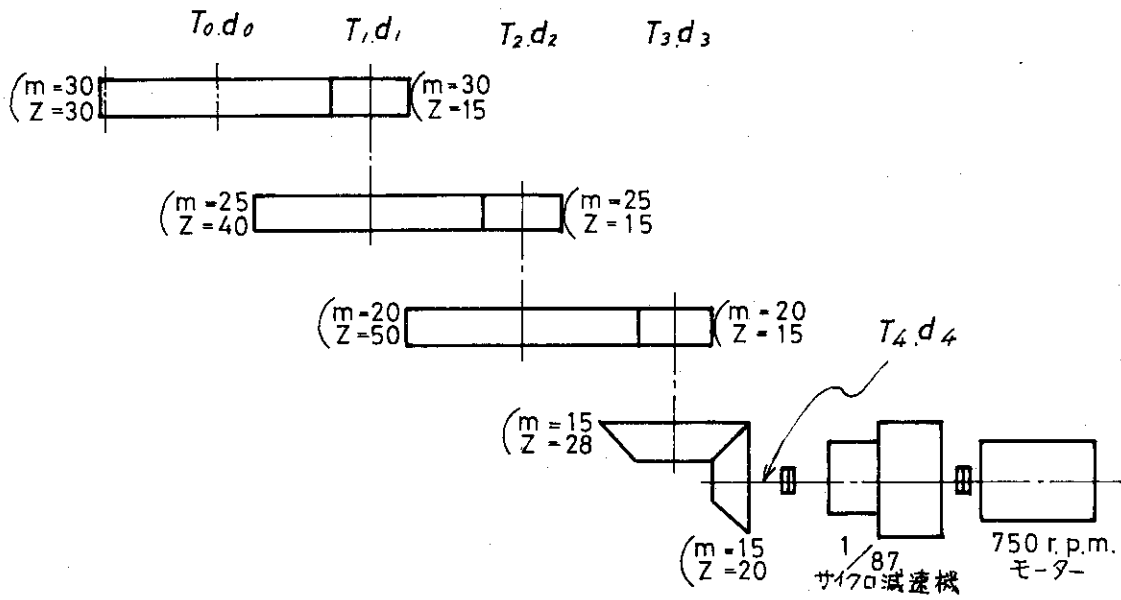


Fig. 5.10 駆動機構

③ 歯車強度

下部の2個の駆動ギヤで扉の駆動を行い、上部の2個の駆動ギヤは、扉の上下の運動をスムーズにする目的で設けるものとし検討する。各軸に働くトルク、接線力、及び軸径を Table 5.7 に示す。但し、軸径d は、起動時トルクより算出した。

Table 5.7 駆動装置歯車のトルク、接線力、軸径

記号	T (t·m)	$P_{(t)} \frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	T' (t·m)	$P'_{(t)} \frac{\text{小歯車}}{\text{大歯車}}$	d (mm)
0	—	12.5	—	25	170
1	3.0	$\frac{13.2}{6.0}$	5.9	$\frac{26.3}{11.8}$	150
2	1.2	$\frac{6.4}{2.4}$	2.3	$\frac{12.3}{4.6}$	130
3	0.4	$\frac{2.7}{1.9}$	0.7	$\frac{4.7}{3.3}$	100
4	0.3	2.0	0.5	3.4	80

また、駆動装置の歯車の仕様は、Table 5.8 の通りである。

Table 5.8 駆動装置歯車の仕様

記号	モジュール M	歯車 Z	ピッチ円直径 D (mm)	歯幅 b (mm)	接線力 P' (t)	伝達可能接線力 P ₀ (t)
0	30	30	900	100	25	39.7
1	$\frac{30}{25}$	$\frac{15}{40}$	$\frac{450}{1000}$	$\frac{100}{50}$	$\frac{26.3}{11.8}$	$\frac{32.1}{18.0}$
2	$\frac{25}{20}$	$\frac{15}{50}$	$\frac{375}{1000}$	$\frac{50}{30}$	$\frac{12.3}{4.6}$	$\frac{13.4}{9.1}$
3	$\frac{20}{15}$	$\frac{15}{28(40)}$	$\frac{300}{420}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{4.7}{3.3}$	$\frac{6.4}{4.3}$
4	15	20 (28)	300	30	3.4	3.9

(5) その他の扉開閉装置

(2), (3)項において、スライド式扉の開閉装置について述べた。油を使用すると、その保守が大がかりとなり、一旦、油圧系統が故障すると多量の油を取り扱うことになり、好ましくないという理由で油圧方式を採用しなかったが、ここで油圧方式について概略検討してみる。

油圧ポンプ、タンク、制御装置等は、特定の場所に格納しておくものとし、ここでは、直接、扉の部分についてのみ述べる。できる限り場所をとらない方法として次のような方法が考えられる。

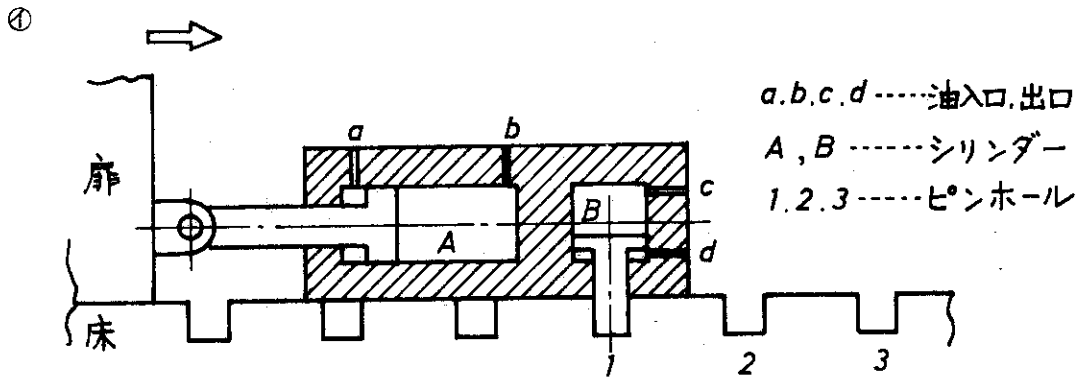


Fig. 5.11 扉開閉装置

Fig. 5.11 に示すような油圧ジャッキを利用し、次のような順序で扉を移動する方法である。例として図の矢印方向へ扉を移動する場合を述べる。

- ① 図の様な状態で、a ポートに圧力をかけ、b ポートの圧力を抜く。扉はロッドの動きに伴い矢印方向へ移動する。
- ② 最大ストローク移動したところで、d ポートに圧力をかけc ポートより油を逃がしてやる。ロッドはピンホールより抜ける。
- ③ b ポートへ圧力をかけ、a ポートの圧力をぬく。B シリンダーのロッド位置が、このピンホール位置へくるまで移動する。このとき、扉は停止したままである。
- ④ c ポートに圧力をかけ、d ポートの圧力をぬく。ロッドはこのピンホールへ入る。

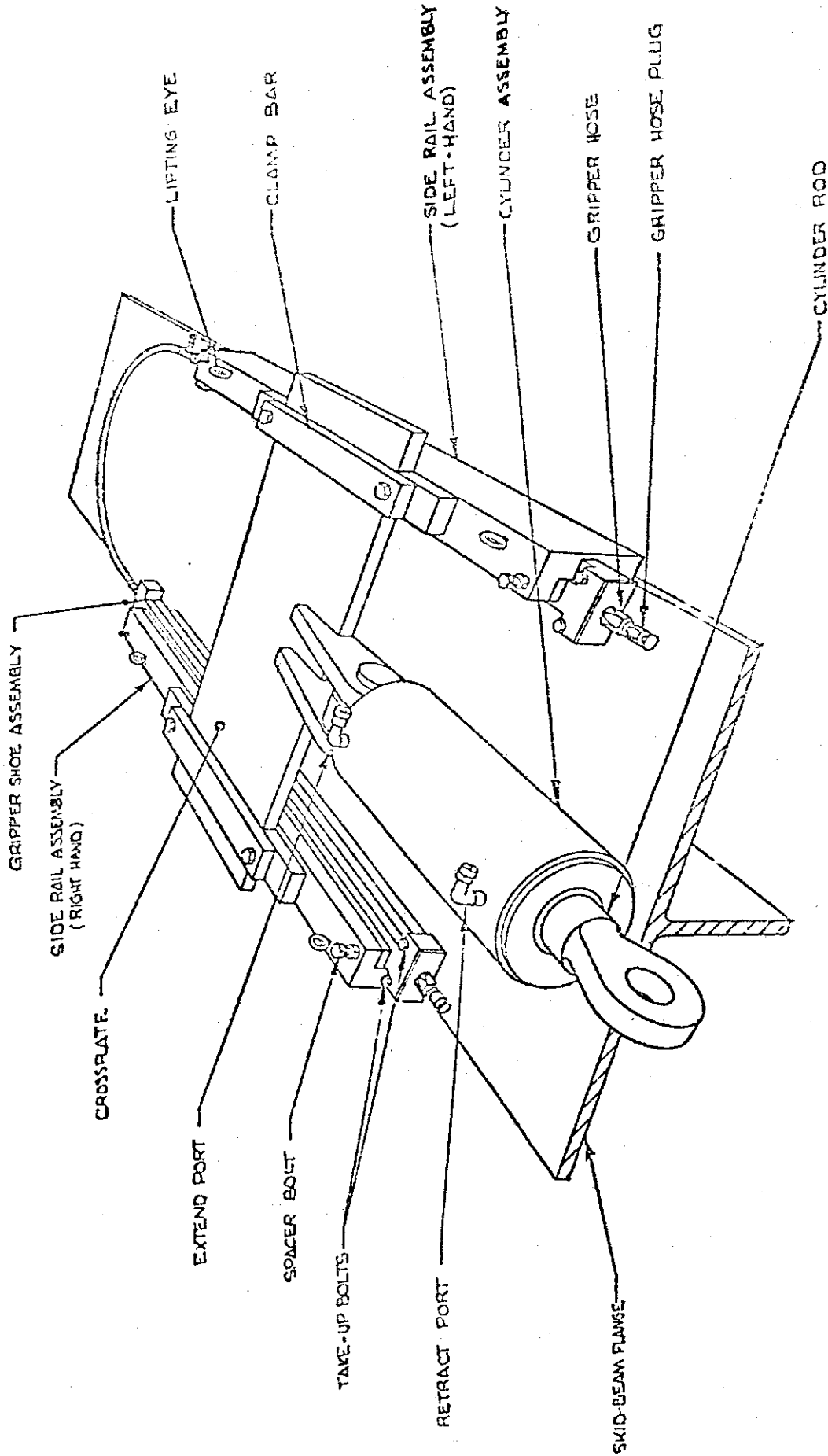


Fig. 5.12 Gripper jack assembly

⑤ 以上の動作をくりかえす。

逆の移動も、シリンダーの動作順序をかえてやることにより行うことができる。

⑥ Fig. 5.12 に参考図を載せた。移動の要領は、④の方法と同様である。ただし、ここではピンホールにロッドを挿入するかわりにグリッパーに油圧をかけることによりスキッドビームをはさみつける方法である。

扉すべり面の断面図は、Fig. 5.13 のようになる。

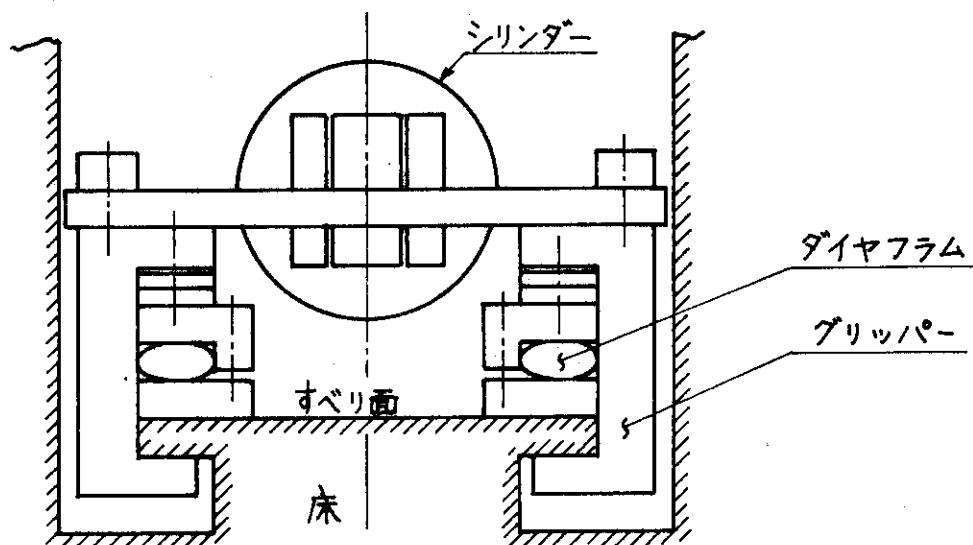


Fig. 5.13 扉すべり面及びグリッパージャッキ断面図

(6) レール

扉を開けた後、扉底部に相当する床面に台車用レールを敷き、扉をはさんで隣り合う部屋のレールを接続しなければならない。

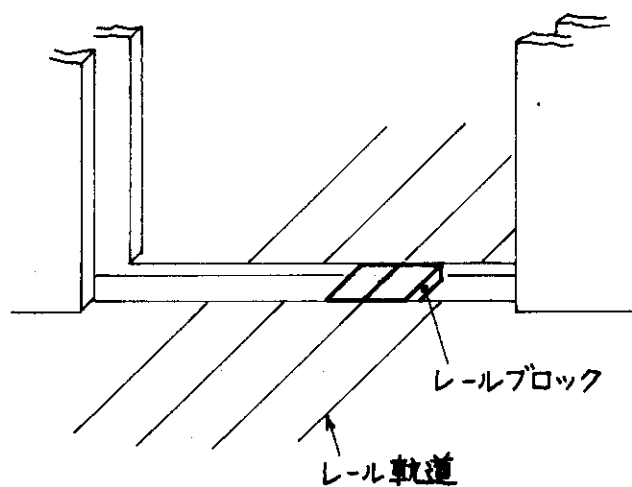


Fig. 5.14 レールブロック

Fig. 5.14 に示すように扉底部に相当する床面は、床レベルより少し低くしておき扉を開けた

後、その溝にレールブロックを埋める。

レール本数だけの数のブロックを次々に埋めていき扉をはさんで隣り合う部屋のレールの接続を行うものとする。

台車移動後、このブロックを取りはずし扉を閉める。

溝深さ 100 mm, 幅 650 mm, ブロック幅 800 mm とするとブロックの概略重量は,
 $W = 10 \times 65 \times 80 \times 8 \times 10^{-3} = 416 \text{ kg}$ となる。炉室の下部大径ポロイダルコイル昇降用ピットの所で用いたレール保護板に比較するとさほど重くもない。又、このブロック底部は床面と全面的に当り強度的にも問題ない。

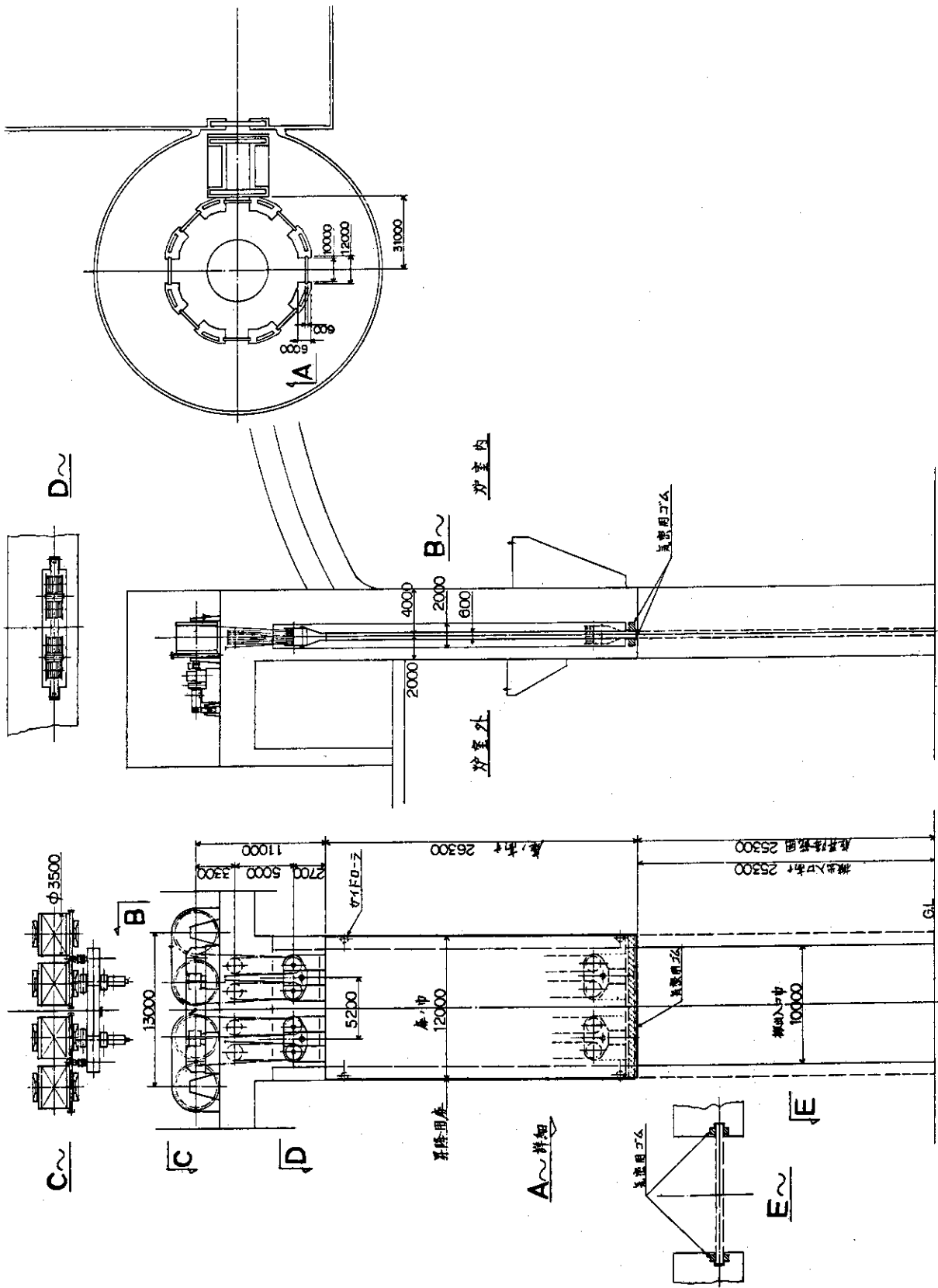


Fig. 5.15 1000 t 用扉昇降装置

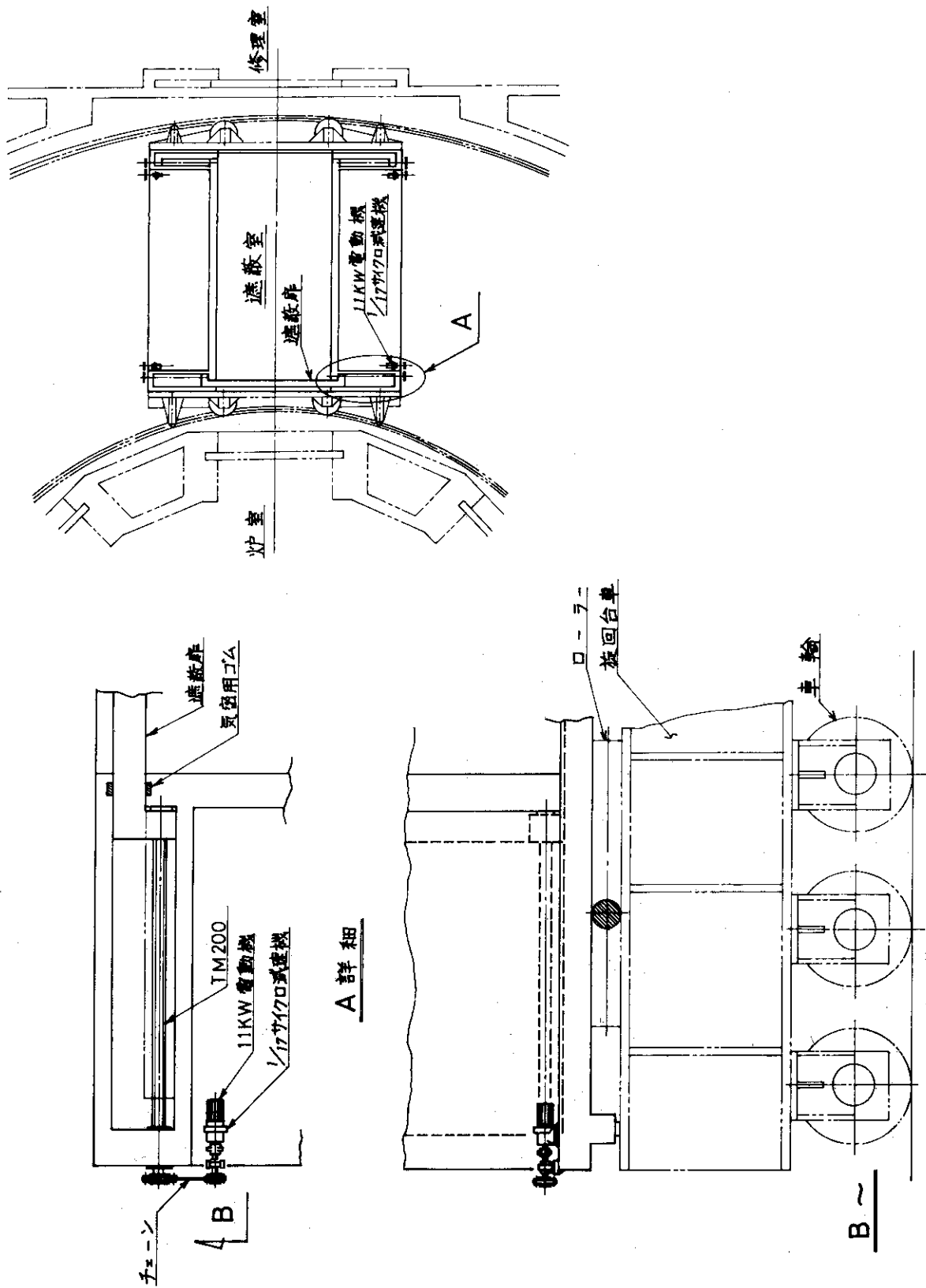


Fig. 5.16 遮蔽室遮蔽扉駆動装置

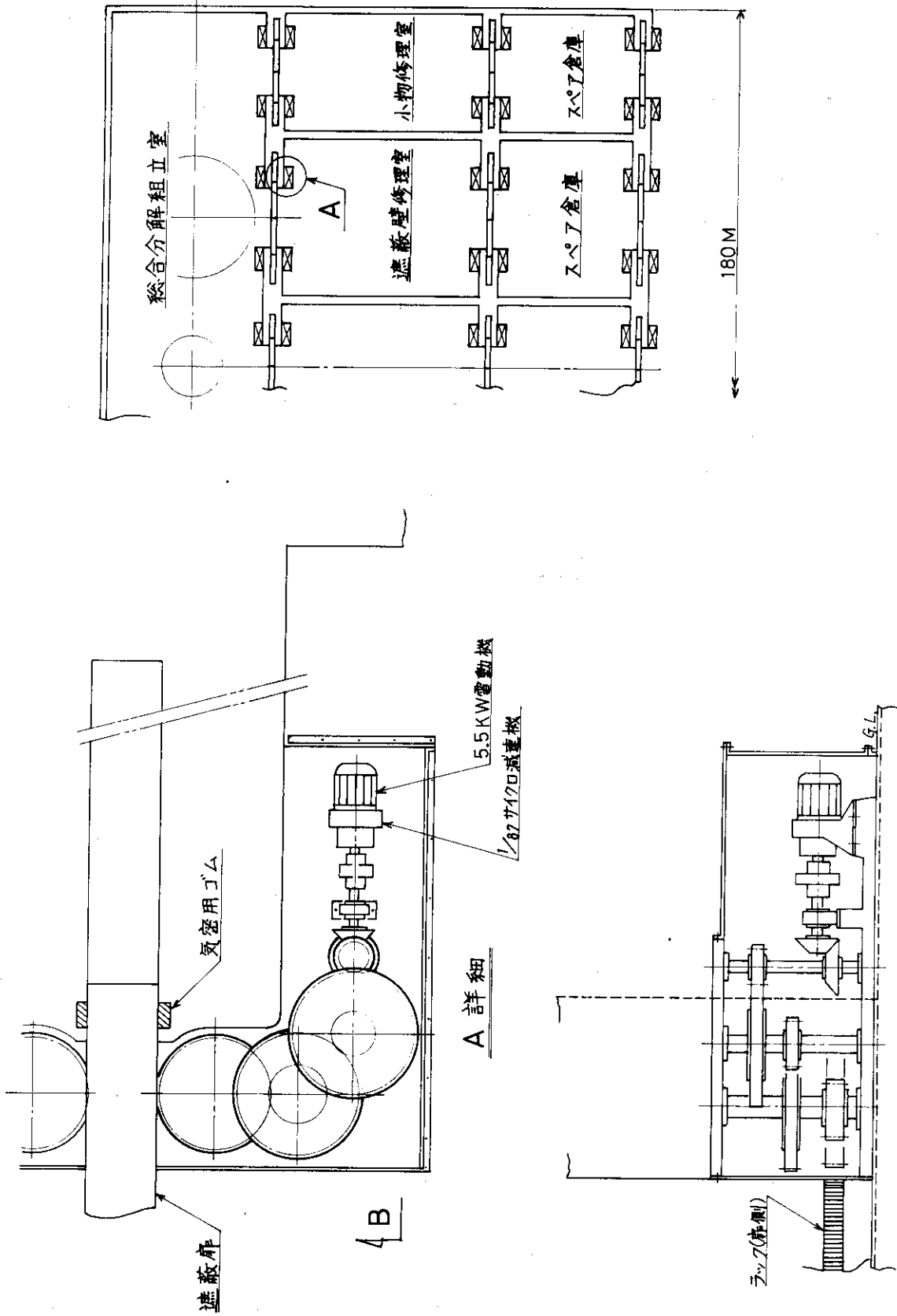


Fig. 5.17 修理室遮蔽扉駆動装置

5.4 修理室設計

(1) 概要

炉本体から解体された故障炉モジュールは、旋回台車をへて修理室へと搬送される。故障炉モジュールが、総合分解組立室 (Fig. 5.23 参照) へ搬入されると、あらかじめ炉モジュールスペア格納室に用意してあった炉モジュールスペアを炉室へ搬入し炉本体へ組込む。

部品の修理において、放射能レベルの極端に違うものを同じ装置又は同じ部屋で取り扱おうと問題が生じる。ここでは、基本的には、総合分解組立室において、炉モジュールからの各部品の解体を行い、解体した部品をただちに各々専用の修理室へ搬入し修理を行う。しかし、修理不可能部品は、当然、スクラップとしスペアと交換する。修理の完了した部品は、その修理室において単独に検査される。検査終了後、部品を再度総合分解組立室へ搬送し炉モジュールへの組込みを行う。組立てが完了すると、炉モジュールを検査室へ移動し、細部にわたる厳密な検査を行う。その後、炉モジュールスペア格納室に格納する。

以上のような方針にしたがい、修理室の配置は、解体の対象となる部品専用の修理室前まで炉モジュールを搬送し解体作業ができるように、総合分解組立室と各部品専用の修理室とがそれぞれ隣りあうような配置とした。部品スペア倉庫は、外部から直接搬入可能で、しかも、倉庫から部品修理室へスペアの搬入が直接行われるような配置とした。炉モジュールスペア格納室は、炉室にできるだけ近い位置とし、検査室は、細部にわたる検査が余裕をもって行えるようできるだけ広い部屋とした。

又、炉モジュール移動用の台車の方向転換は、ターンテーブルで行うものとした。

修理室の配置を Fig. 5.23 に示す。

修理の対象となる部品として次のようなものがあげられる。

- ① ブランケット
- ② 遮蔽室
- ③ トロイダルコイル
- ④ NBI
- ⑤ その他小物

炉本体から取りはずさなくても修理可能な故障も考えられるが、ここでは、修理室へ搬送する場合についてのみ検討する。

(2) ブランケット修理

ブランケットの故障として次のようなものが考えられる。

- ④ スパッターによるブランケットセル表面の損傷
- ⑤ ヘッダーにフランジ継手を用いた場合の O リングからの洩れ

しかし、現在のところ故障項目については明確になっていないのでこれに限定されない。

④のブランケットセル表面の損傷において、修理可能な故障としてはピンホール、ヘアクラック等が考えられる。リング状ブランケットの中の1つのブランケットセルが修理不可能な場合とか、全周にわたる表面の均一な損傷の場合には、ブランケットセルと固定用フランジが溶接により固定されているため、リング状ブランケットをスクラップしスペアと交換せざるをえない。

㊸においては、故障部のフランジ結合の解除後、Oリングを取り替えればよく、特に大がかりな修理機構はいらない。

修理流れ図を Fig. 5.18 に示した。また㊸について、修理項目をさらに、細分化し Fig. 5.19 に示した。

Fig. 5.19 に示すように、ブランケット修理室内での作業項目が多く、装置も多種類にわたる。したがって修理室は、互いに干渉しないような装置の配置はもちろん、順序だった作業ができるよう効率のよい装置の配置が必要である。

又、ブランケットの放射化が非常に高レベルなため、他室に比べて嚴重な雰囲気管理がなされなければならない。

ブランケット修理における問題点として次のようなことがあげられる。

1. ヘッダー結合方法

㊸ フランジ方式

すべてのリング状ブランケットに対応する箇所にフランジ継手を用いねばならず、フランジの数が多数になったときの洩れに対する信頼性に問題がある。

㊹ 溶接方式

ヘッダーとブランケットセルの間に枝管が密集しており、ヘッダーに取り付ける溶接機等のためのスペースに問題がある。

2. スペア

ヘッダー等の結合部の洩れ管理が非常に厳しいため、スペアの製作時の製作誤差を無くすような相当高度の生産技術が要求される。又、製作誤差がやむをえない場合、いかにして製作誤差を吸収するかというような考慮がはらわれなければならない。

(3) 遮蔽壁修理室

遮蔽壁の故障については、次のようなものが考えられる。

㊸ スパッタリングによる壁面の損傷

㊹ 遮蔽壁内の冷却システムの故障

㊺ コンクリートの亀裂

㊸のスパッタリングによる壁面の損傷については、肉盛り程度でまかなえるようなものでなければ修理不可能である。㊹、㊺については、故障箇所が遮蔽壁の内部であるためその修理もまず不可能と考えてよいであろう。

遮蔽壁修理流れ図を Fig. 5.20 に示す。

(4) トロイダルコイル修理室

トロイダルコイルの故障として、次のようなものが考えられる。

㊸ 電気システムの故障

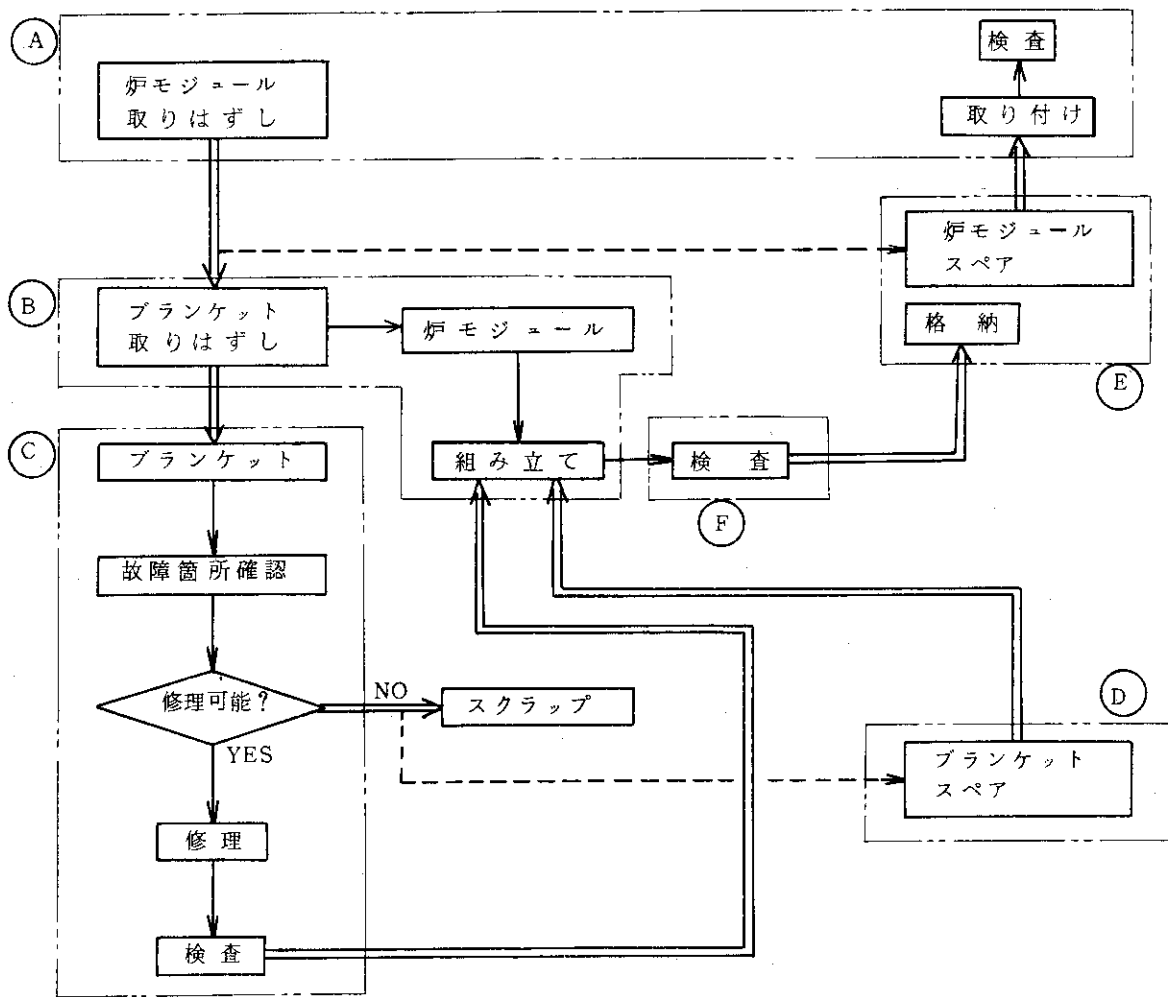
㊹ 冷却システムの故障

㊺ 真空容器の故障

㊸、㊹については、その修理の可能性が明確でないためここでは触れない。

㊺の真空容器の故障については、溶接部の洩れ、内外力による容器の損傷等が考えられる。

したがって、トロイダルコイル修理室には、真空容器の切断溶接機程度の装置が考えられる。



(A) ; 炉室

(B) ; 総合分解組立室

(C) ; ブランケット修理室

(D) ; スペア倉庫

(E) ; 炉モジュールスペア格納室

(F) ; 検査室

⇔ ; 移動ライン

→ ; 動作ライン

- - - → ; パイロットライン

Fig. 5.18 ブランケット修理流れ図

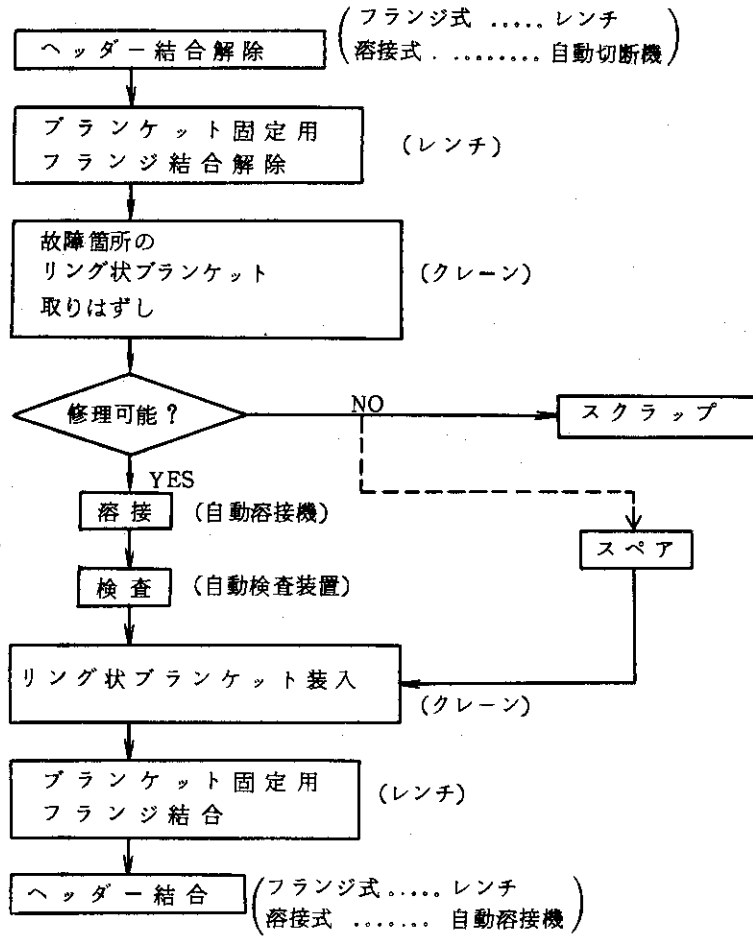
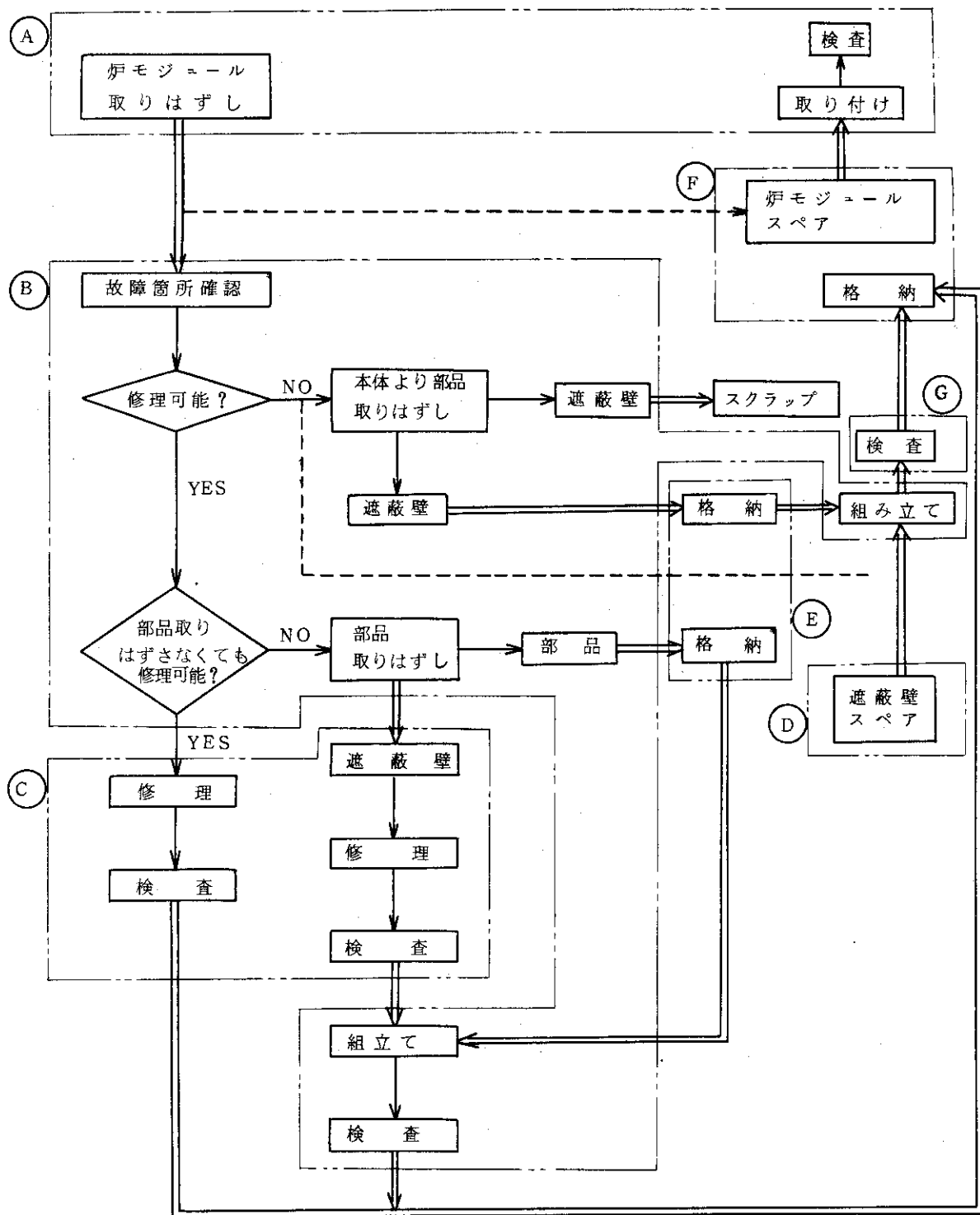


Fig. 5.19 ブラケット修理流れ図詳細



- (A) ; 炉室
 - (B) ; 総合分解組立室
 - (C) ; 遮蔽室修理室
 - (D) ; 遮蔽壁スペア倉庫
 - (E) ; 各部品専用修理室
 - (F) ; 炉モジュールスペア格納室
 - (G) ; 検査室
- ≡≡≡ ; 移動ライン
 → ; 動作ライン
 - - - - ; パイロットライン

Fig 5.20 遮蔽壁修理流れ図

しかし、電気系統及び冷却系統の故障に対する修理の検討が進められていくに従い必要な装置、空間等に対する考慮がはられなければならない。

トロイダルコイル修理流れ図を Fig. 5.21 に示す。

(5) NBI 修理室

NBI の故障としては、次のようなものが考えられる。

- ① クライオパネルの吸着剤の脱落
- ② イオン源のフィラメントの破損
- ③ ゲートバルブのシート面の損傷
- ④ Oリングの損傷

①、②及び④については、NBI 内部の真空度が保持できなくなり重要な問題である。又、③については当然のことであるがイオンが作れず NBI としての機能をはたさなくなる。

これらの故障においては、故障した部品をスペアと交換しスクラップとすることになる。したがって、NBI 修理室には、NBI 分解組立のための一連の装置が必要である。

NBI 修理流れ図を Fig. 5.22 に示す。

(6) 小物修理室

前述したブランケット、遮蔽壁、トロイダルコイル及び NBI 以外のものとして、排気系統の故障が考えられる。これらは、クレーン及び台車により修理室へ運ばれる。

排気系の故障として、ゲートバルブ及びクライオパネル等が考えられる。ゲートバルブにおいてはシール面の破損等により気密がたもてなくなるという故障が考えられる。繰りがえし荷重がかかるための疲労が主な原因と思われ、他に直接的な要素は考えられない。したがってゲートバルブは定期的に交換することになる。修理としてはシール面の交換が考えられる。しかし、シール面の交換が可能か否か構造上明確でない。

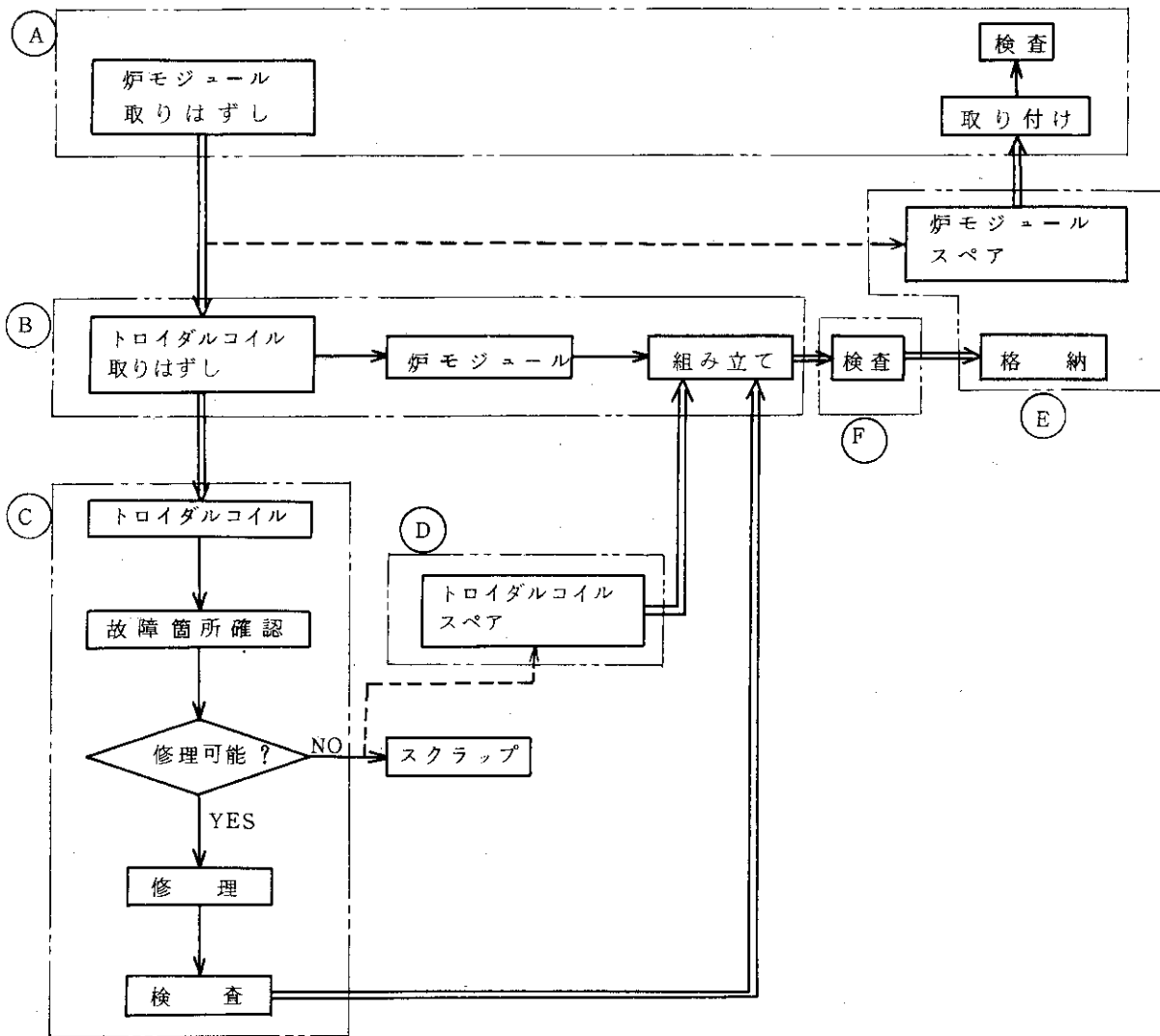
クライオパネルについては、吸着剤の脱落による機能の低下が考えられる。したがって修理としては、吸着剤の再塗付ということになるが、再塗付可能か否か現在明確ではない。

その他の小物の修理もこの修理室で行うことになる。したがって、多種多様の機能をもつ装置がこの部屋には必要になる。

(7) まとめ

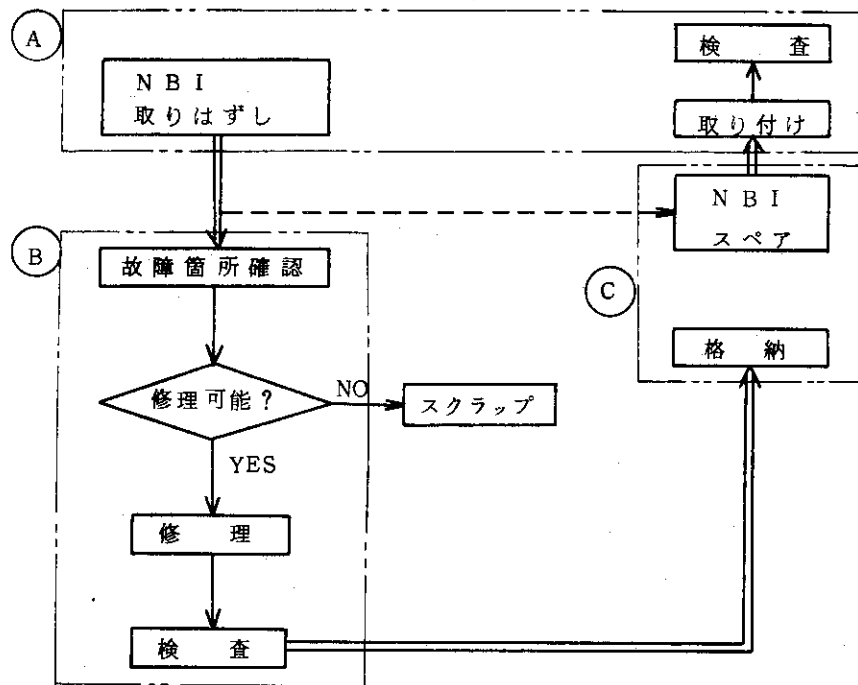
以上修理室の検討をしたが、メカニカルリミタの修理は NBI 修理室で、トロイダルコイルの修理はトロイダルコイル修理室でそれぞれ行われるものとする。

炉各部分の構造は未確定な点が多く詳細な修理室の検討を進めることは難しい。したがって、今後炉本体の設計を進めていく上で修理に対する十分な考慮をはらい各々の部品の設計をすることが必要であろう。



- (A) ; 炉室 ⇔ ; 移動ライン
- (B) ; 総合分解組立室 → ; 動作ライン
- (C) ; トロイダルコイル修理室 - - - ; パイロットライン
- (D) ; スペア倉庫
- (E) ; 炉モジュールスペア格納室
- (F) ; 検査室

Fig 5.21 トロイダルコイル修理流れ図



- (A) ; 炉室
- (B) ; NBI 修理室
- (C) ; 倉庫

- ==> ; 移動ライン
- > ; 動作ライン
- - -> ; パイロットライン

Fig 5.22 NBI 修理流れ図

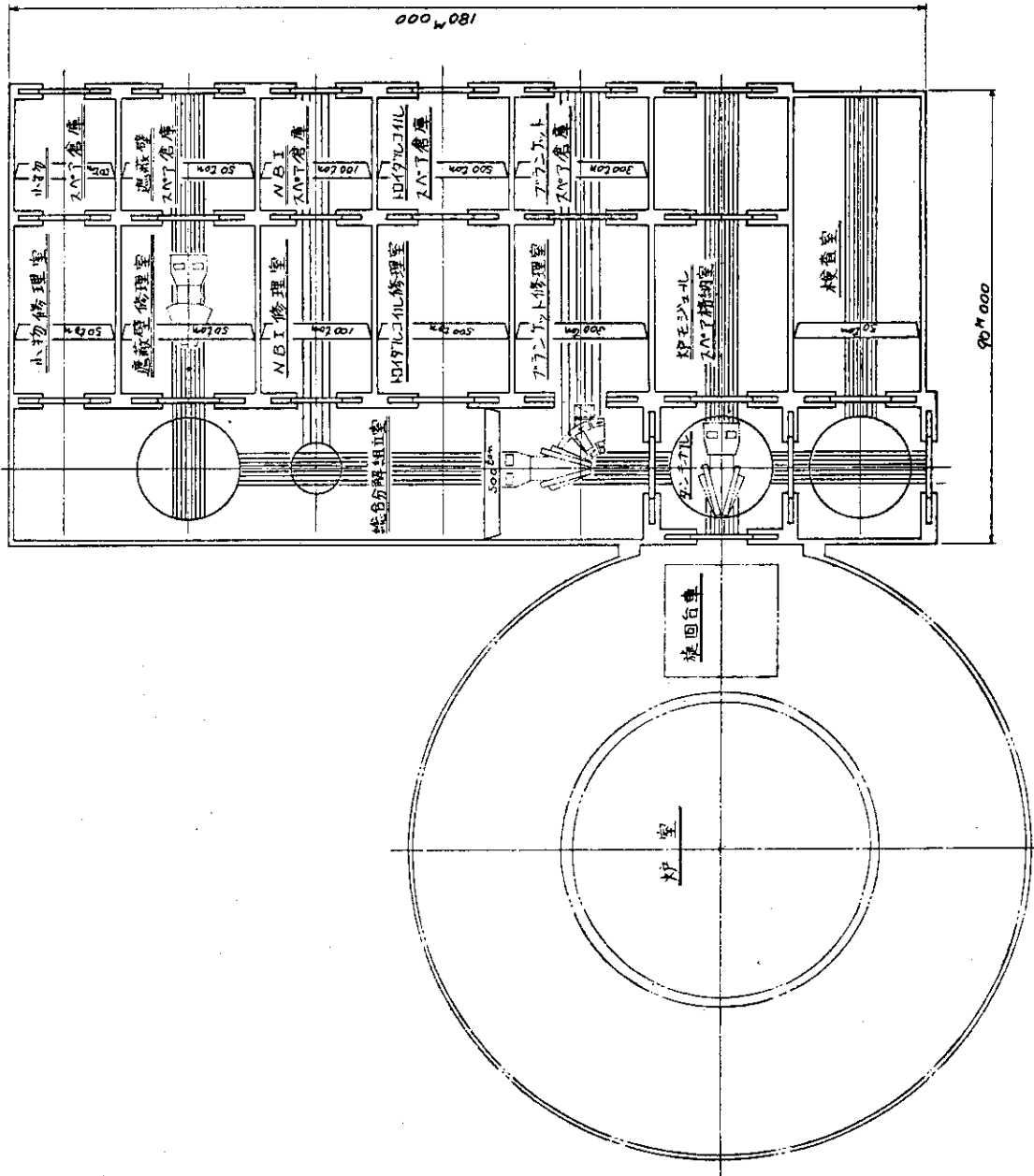


Fig. 5.23 修理室配置図

5.5 建屋全体

原研が発表している建屋レイアウト図をFig. 5.24, Fig. 5.25 に示す。

しかし、これらの図の中には、分解修理面及び他の観点からみた改善点がいくつかある。主として、3章：分解修理装置の設計、4章：炉の構造設計、5章：建屋に関する検討；の中から変更すべき点が生じた。それらを考慮した結果、分解修理の面から導き出した建屋概念図として、Fig. 5.26, Fig. 5.27 を提案する。

以下に前者と後者との主な相違点を列挙する。

- (1) 炉本体は G.L. に直接固定されるのではなく、車輪台車の上に載った状態で固定される。
したがって、炉本体は、そのぶん高くなる。
- (2) 炉室の上に、炉室扉を昇降させるウインチ装置が取り付く。したがって、建屋が高くなる。
- (3) 解体作業を検討した結果、クレーン定格荷重が変わる。
- (4) 故障した炉モジュールの修理方法がある程度細かく検討した結果、修理室は炉室に比較してかなり広くなる。
- (5) 炉室の耐震計算より、炉室の壁が厚くなる。
- (6) 旋回台車軌道の床面強度計算より、コンクリート床を厚くした。
- (7) 地下室が広すぎるので、仕切り壁を設けた。

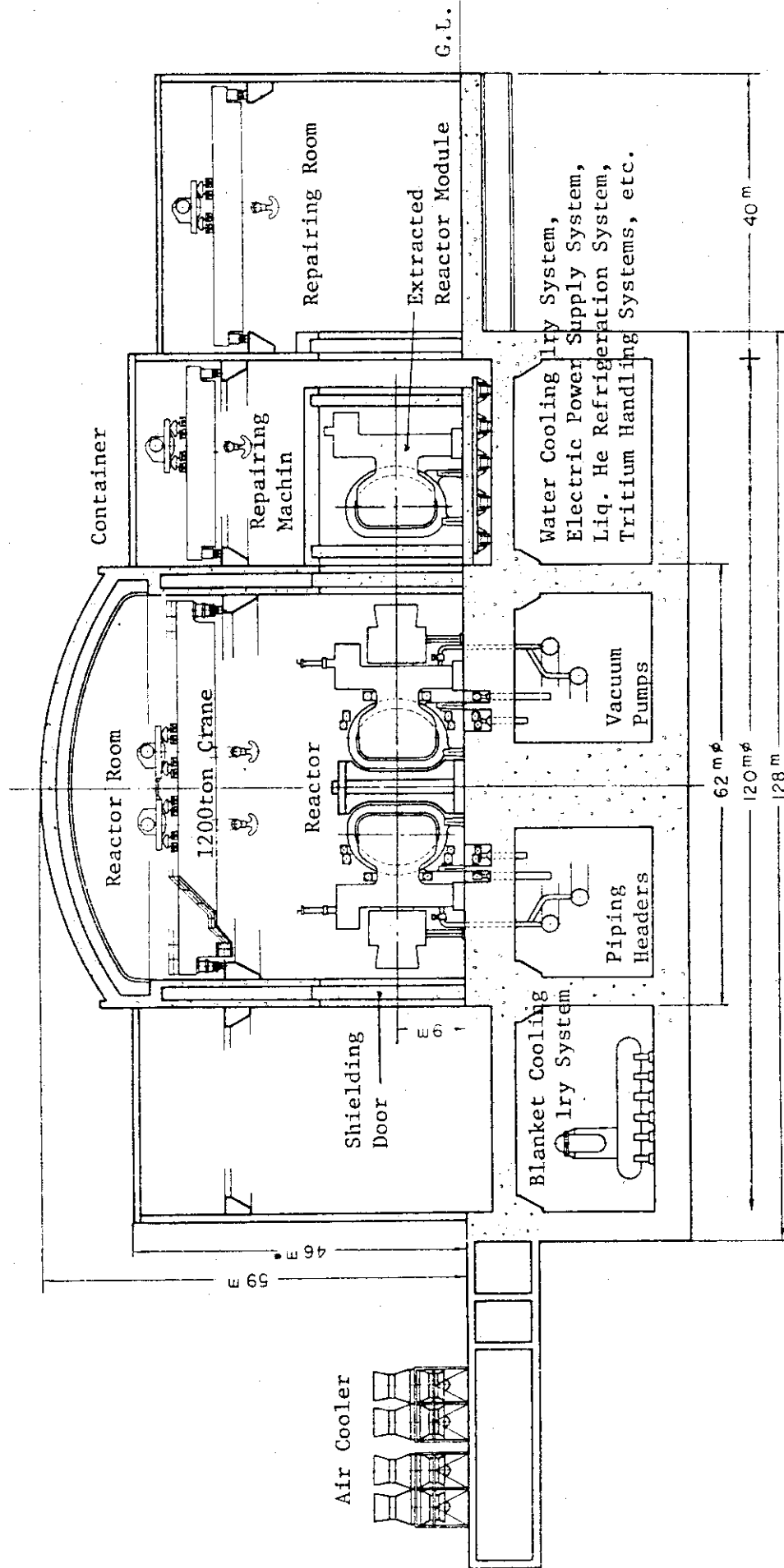


Fig. 5.24 Concept of the reactor building and the plant layout

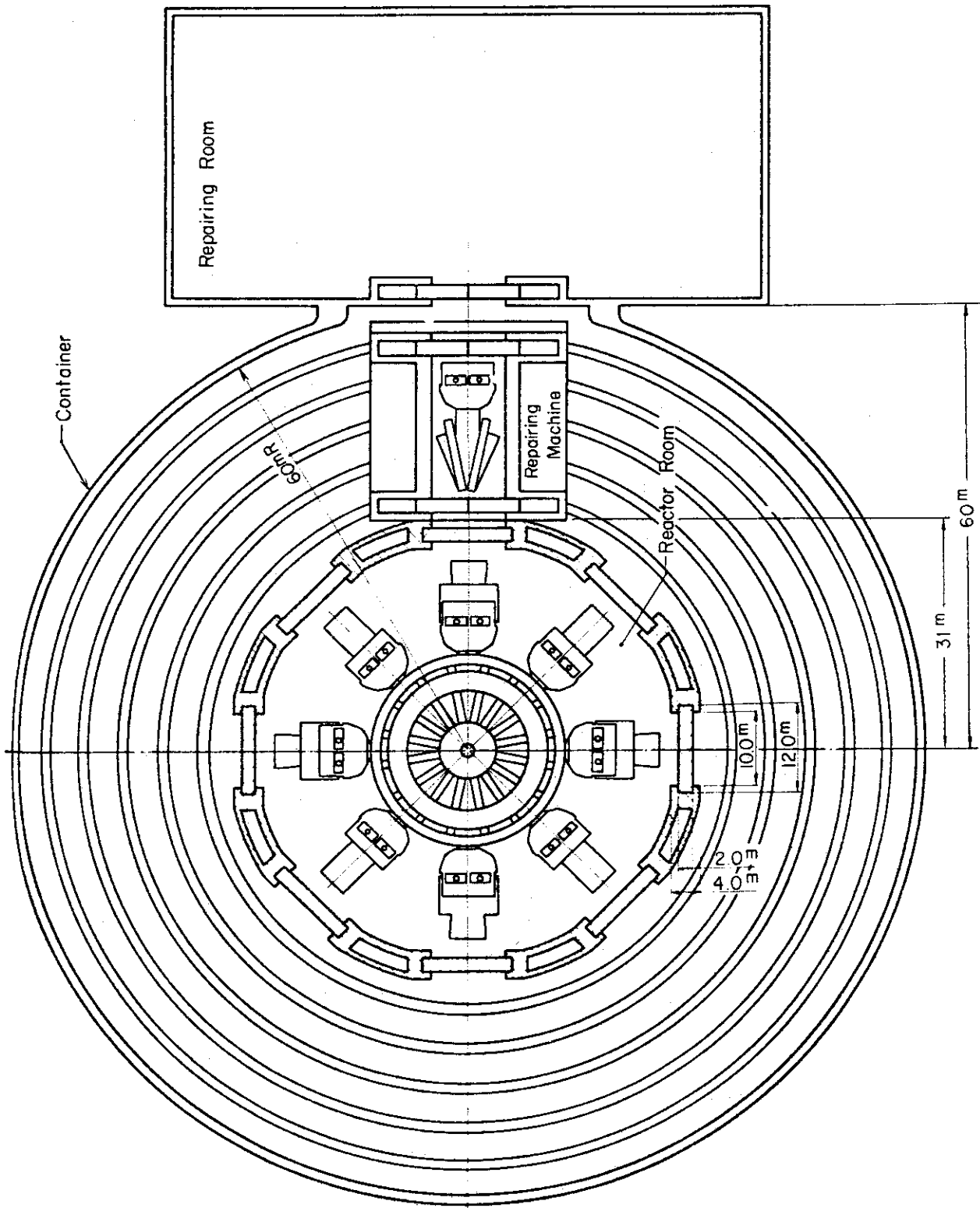


Fig. 5.25 Horizontal view of the reactor building and the reactor layout

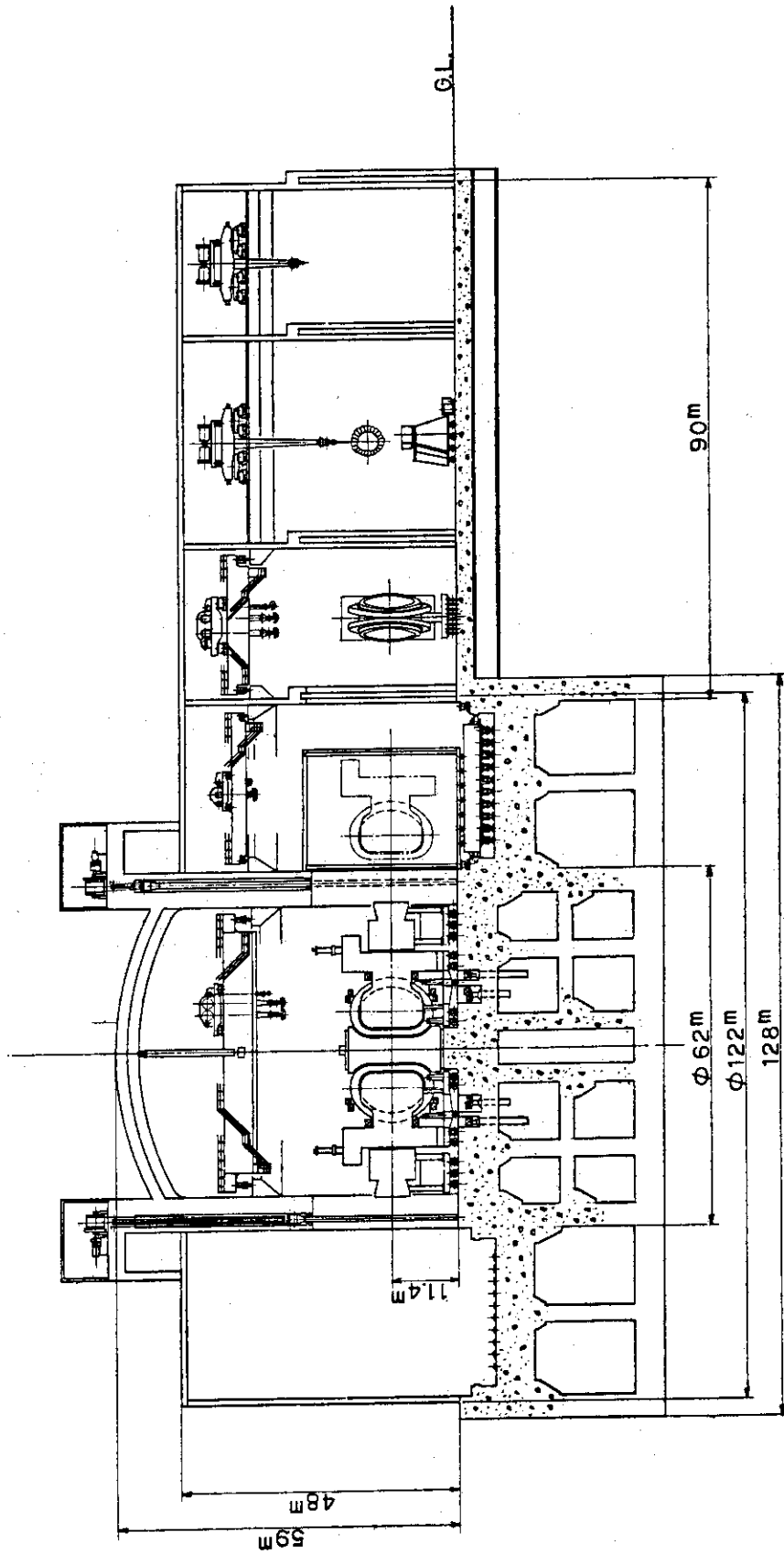


Fig. 5.26 建屋全体図 (1/2)

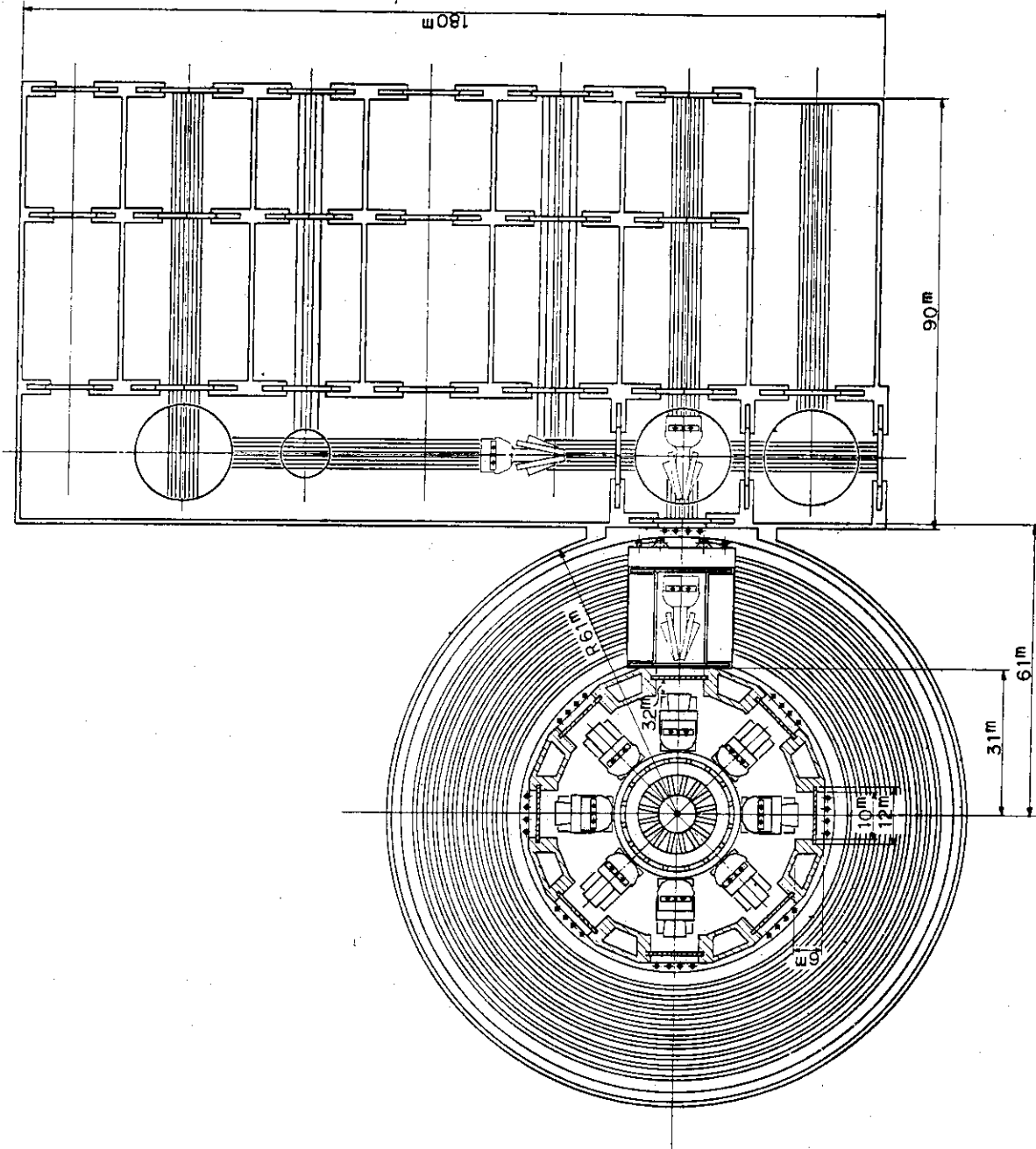


Fig. 5.27 建屋全体図(2/2)

6. 分解修理に関する安全対策

将来の新しいエネルギー源として、核融合が大規模に実用化されることを考えるならば、その安全性に関する研究は、重要な使命を帯びることになる。

最近になってこういう方面の認識が高まり、徐々に研究報告が増してきた。

核融合の安全性に関する一般論的な検討はそれらの報告書にゆずり、本報告書の中で述べたい点は、分解修理に伴って生じる危険をある程度想定し、それらに対しての安全対策を考えることである。

大きくは次の3点に絞られる。

- ① 解体作業中に生じる2次故障の対策
- ② 炉の真空シール部を破るために生じるトリチウム対策
- ③ 炉モジュール解体時の放射線遮蔽対策

以下、これらの項目について検討を行う。

(1) 解体作業中に生じる2次故障の対策

核融合炉分解修理を行うために設備されている機器や装置は、核分裂炉に使われているもの以上に信頼性が高くなければならない。

したがって一般機械（例えば、産業機械や建設機械）よりも数倍安全率を多くする必要がある。また、それらの設備は、使用前や定期的に正常な機能を果たし得るかどうかの点検が必要である。

修理に使用される装置を分類すると、

A類……作業車、自動溶接切断装置、TV装置、溶接部検査装置、油圧ジャッキ、ウォームジャッキ、各種マニピュレータ

B類……台車類、天井クレーン、ゴンドラ、扉昇降及び開閉装置

となる。この分類の仕方は、A類はもし故障したならば、かわりのスペアを用意しておいて簡単に取替えができるものである。B類は、非常に重量が重く、かわりのスペアを用意できず、故障した場合はその修理も非常にめんどろであり、修理時間もそうとうかかるものである。

特に台車の中の引出用台車と旋回用台車は、上に載る構造物が超重量物のため、天井クレーンやジャッキでは持ち上がらないので、車輪廻りが故障して取替えるといっても容易でない。1つの方法としては、レール軌道の1部分を取り外し可能にしておいてピットを設け、その中へ故障した車輪軸受をおろし、新しいのととりかえる。

レールだけでは強度不足なので、2.1項の中で述べているレール保護板の上にレールを敷くものとする。(Fig. 2.7 参照)

他の天井クレーン、ゴンドラ、扉昇降及び開閉装置については、冒頭に述べたように丈夫に作ることで、2次故障の発生を防げるであろう。

(2) 炉の真空シール部を破るために生じるトリチウム対策

修理のために炉の真空を破る前には、十分な誘導放射能減衰を得るため、1日ないし1週間の減衰期間を設ける。その期間中に炉（真空容器）内の不純物を十分に排気することは可能である。

また、主冷却系のヘリウムガスを減衰期間中に、充分循環することによってシステムの途中でナトリウム除去が行われる。したがって、ブランケット容器および冷却配管から炉（真空容器）中へのトリチウム漏洩は、極力防ぐことができる。

1次系のトリチウムの流れ図を Fig. 6.1 に示す¹⁾。

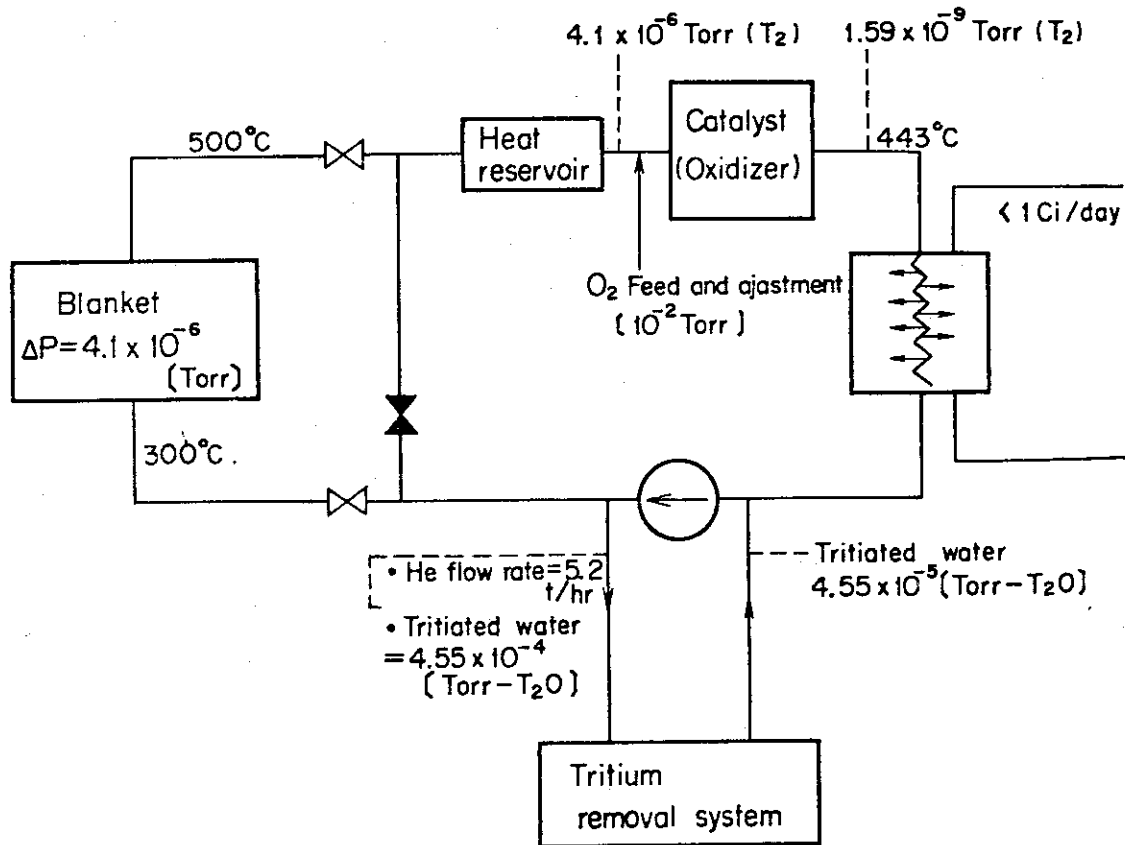


Fig. 6.1. 1次系のナトリウムの流れ

次に真空を破った段階では、炉室内の大気が炉（真空容器）内に侵入し、炉内表面に付着していたトリチウム（真空を破る前の段階で処理しきれなかったもの）は炉室内へ拡散する。その場合、炉室内のトリチウム量を測定するとともに、トリチウム除去、換気を充分行わなければならない。

一般にトリチウムは、ガス状（HT）のものを CuO や Pd などの酸化触媒により酸化（HTO）させ、モレキュラーシーブ等の吸着剤で除去する。

そして、捕集されたトリチウムは、精製して再び燃料とするか、あるいは液体放射性廃棄物として処理される。しかし現段階では、精製処理は難しいといわれている。

さて、通常炉の運転中でも、トリチウムはわずかではあるが、炉室内へ洩れている。そのため、換気系には、感度の良いトリチウムモニターが設置され、常時分析記録されている。

また、トリチウム除去も行われている。

したがって、真空を破ることにより炉室内へ拡散するトリチウム量は、通常より増えるかもしれないが、十分な測定および除去により外部に対する影響は何ら変わらないものと思われる。

(3) 炉モジュール解体時における放射線遮蔽対策

故障した炉モジュールを修理室へ運ぶ途中、分割部と中性粒子入射加熱装置開口部が露出する。Fig. 6.2 に示したように、3ヶ所の開口部ができる。そのため、その方向に対する γ 線の強さはかなり高くなる。

一応、旋回用台車上の遮蔽室では、露出したままの状態の炉モジュールを想定したモデル化によって γ 線遮蔽解析を行い、壁厚さ60 cm (重コンクリート)を決定している。

基本的に、真空を破った状態においては、人は近づかないという原則を守れば、かなりの強さの γ 線が存在してもかまわないことになる。

しかし、開口部に盲蓋を取り付けるようにすれば、緊急時に人が近づくことも可能になる。例えば、Fig. 6.3 のようなものが考えられる。

ブランケット修理室においては、ブランケットを全面的に露出させなければならないので、遮蔽対策は不用である。

但し、そこは修理室中最も高レベルの汚染室になるので、その部屋内にある各種機器や装置に対して、厳しい管理が要求される。

参考文献

- 1) 炉設計研究室 : JAERI-M 7300 (1977) 9月
「核融合実験炉第一次予備設計」

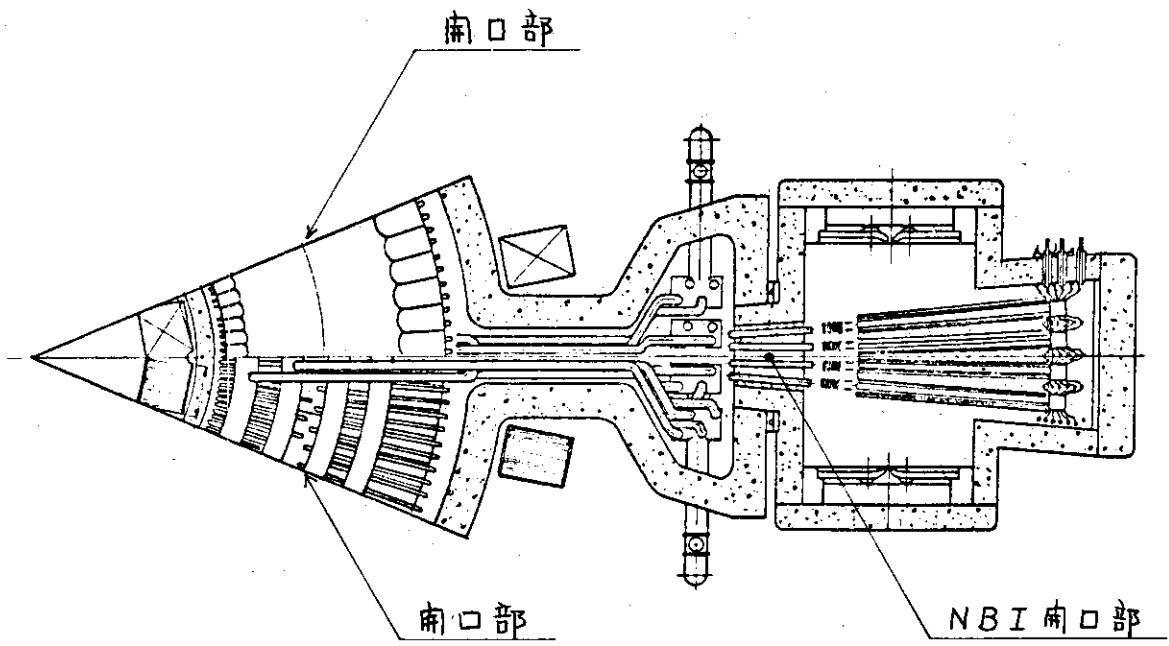


Fig. 6.2 炉モジュール開口部

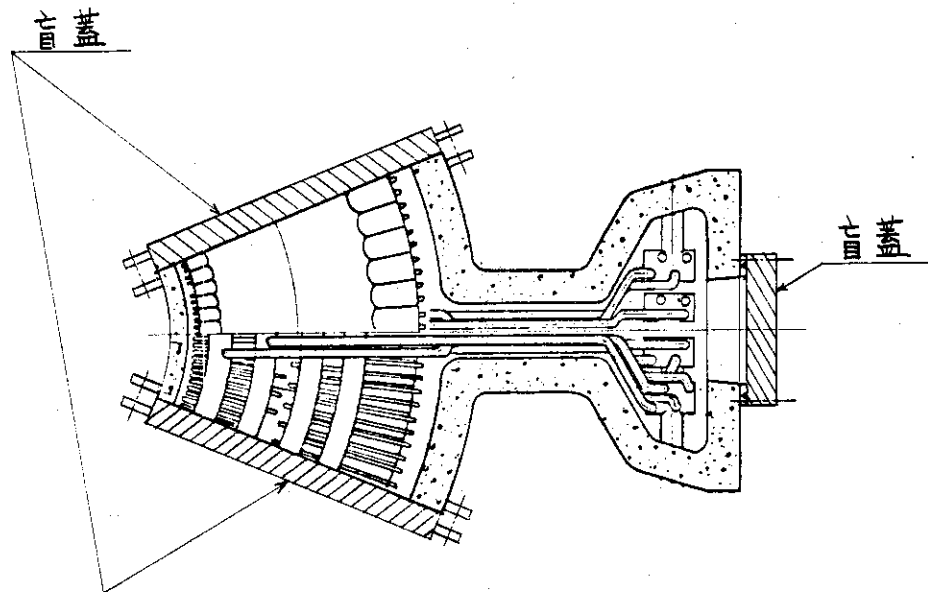


Fig. 6.3 盲蓋取付図

7. 放射性廃棄物処理対策

核融合炉の場合に生じる放射性廃棄物としては3種類考えられる。

- (a) 炉の運転に伴い定常的に発生するもの。
- (b) 分解修理のために生じるもの。
- (c) 炉の寿命がきたときに、放射性廃棄物として取り扱われるもの。

(a)については、従来の原子力発電所の延長として処理できる。

(b)に関しては、故障したコンポーネント等は、修理して再使用することを原則とする。しかし、故障程度によっては、再使用できずスクラップにしなければならないものも生じてくるであろう。けれども今の段階で、そのような量や比放射能を推定することは困難なので、検討項目から除外するものとする。

(c)については、炉の各コンポーネント重量や比放射能の推定値がすでに発表されているので、それをもとに検討できる。これは従来の原子力発電所の処理方法と異なる部分があるので、くわしく検討しなければならない。

したがって(a)(b)(c)のうちの(c)を中心に述べるものとする。

はじめに、我が国の原子力発電所における放射性廃棄物処理方法を述べ、次に(c)を中心とした核融合実験炉の場合における各コンポーネントの処理処分方法を検討する。

(1) わが国の原子力発電所における放射性廃棄物処理方法

(i) 各種放射性廃棄物処理

① 気体廃棄物

一般に気体廃棄物として、気体状あるいは蒸気状の放射性物質を含むものと、放射性の煙霧体(エアロゾル)を含むものとに大別され、両者混在のものもある。

煙霧体では、これを形成する微粒子を高性能フィルタにて濾過する。放射性希ガスに関しては、減衰タンクに貯蔵したり、活性炭充填塔による Delay Bed を採用したりしている。

② 液体廃棄物

液体廃棄物は、機器ドレン、床ドレン、イオン交換樹脂の再生廃液、除染洗濯廃液等に分類されて、濾過、蒸発などで処理されている。

③ 固体廃棄物

固体廃棄物としては、放射線管理区域内から直接発生するものと、気体及び液体廃棄物の捕集処理に伴って発生するものがある。前者については、低レベルのぼろ布や紙などの雑固体廃棄物と呼ばれるものと、炉心で照射された金属を主成分とするバーナブルポイズン(PWRで発生)、ポイズンカーテン(BWRで発生)、制御棒、チャンネルボックス、インコアモニターなどがある。

雑固体廃棄物については、ベイラーと称するプレスで約半分に減容してドラム罐に充填しており、照射された機器等は、使用済燃料プールに貯蔵している。

(ii) 問題点

固体廃棄物でドラム缶に充填された形態となっているものは一部にすぎないが、それでも発電炉一基当り年間 1000 本程度に達しており、タンク貯蔵されているイオン交換樹脂や濾過助剤、プール内、貯蔵されている炉内挿入物も将来は取出して、長期保管、処分に耐える形態とし、最終的に永久処分しなければならない。

また、保守改造に伴って取替えたり撤去されたりする放射性汚染機器や部品の処分、さらには寿命の尽きた発電炉の閉鎖、解体に伴って発生する廃棄物の処理、処分法も確立しなければならない。

(2) 核融合炉における放射性廃棄物処理方法

(i) 概要

核融合炉も核分裂炉と同様、炉の運転に伴って定常的に放射性廃棄物が生じる。その量は非常に多く、固体廃棄物は容積 55 ガロン(約 208 リットル)のドラム缶約 2000 本/年、液体廃棄物は 100,000 ガロン(約 379 m³)/年、気体廃棄物は約 30 キュリー(¹⁴C)と推定されている¹⁾。これらについては、従来の核分裂炉の廃棄物処理技術を応用することにより解析できると思われる。

また、核融合炉では、D-T 反応に伴い放出される中性子により各コンポーネントが放射化され、故障による交換あるいは炉の寿命によりそれらが放射性廃棄物となる。ここで取り扱う対象は後者とする。むしろこれらの方が、廃棄物としてはかなり多くなるであろう。

Table 7.1 には実験炉各コンポーネントの重量が推定されている²⁾。Table 7.2 には、実験炉のブランケット、遮蔽体、トロイダルマグネットの比放射能が示されている²⁾。ここに示されていない中性粒子入射装置、リミッタおよび真空ポンプについては、設計が進んでいないなどの理由により除外されている。

原研では、Table 7.1、と Table 7.2 を推定する上で、次のような仮定を行っている。

- ① 炉は 10 年間運転し、廃棄する。
- ② 各コンポーネントは、故障した場合でも修理して再使用する。その際生じる廃棄物は、一般に微量であると考えられているので無視する。
- ③ 各コンポーネントは、定期的な交換は行わない。

但し、「1.1.2 炉モジュール概算重量」と比べて遮蔽体、トロイダルマグネット、真空ポンプの重量は軽く、NBI & リミッタはわずかに重く見積られている。ブランケットについては、同じ資料に基づいているので、同重量である。

(ii) 処理方法

核融合炉において想定される放射性構造物の廃棄処理は、放射能レベルが高いため、遠隔操作によらねばならない。また、処理すべき廃棄量が非常に多いので、トータル処理処分コストを安くするために、いかに能率良く解体、減容化、パッケージングするかという一連のシステムを開発しなければならない。後者については、完全解体の例として、米国のエルク・リバー原子炉(ERR)の経験、あるいは我が国のJPDR(原研)の部分的解体工事が参考になる³⁾。

考えられる処理方法として、Fig. 7.1 に放射化されたブランケットの処理工程、Fig. 7.2 に放射化された構造物の処理工程を示す。ブランケットの場合は、Li₂O を回収して再使用することも考えられるので、他のコンポーネントと異なる処理工程にしている。次に各フローチ

Table 7.1 Weights of JXFR components

Component	Material	Weight (ton)
Blanket		
vessel	S.S.	900
reflector	S.S.	900
piping	S.S.	200
total		2000
Shielding	Heavy concrete	9000
Toroidal magnet		
structure	S.S.	4000
stabilizer	Copper	840
total		4840
N.B.I. & Limiter	S.S. & H.C.	8500
Vacuum pump	S.S. & H.C.	700

Table 7.2 Specific activity of blanket, shielding and toroidal magnet

Component	Material	Time after shutdown	Total activity (Ci)	Specific activity (Ci/cc)	Main radioactive nuclides
Blanket	S.S.	0	8.1×10^7	$6.9 \sim 7.9 \times 10^{-4}$	$^{56}\text{Mn}, ^{58}\text{Co}, ^{51}\text{Cr}$
		1 month	3.2×10^7	$2.7 \sim 4.5 \times 10^{-4}$	$^{58}\text{Co}, ^{55}\text{Fe}, ^{51}\text{Cr}, ^{54}\text{Mn}$
		1 year	7.8×10^6	$7.0 \times 10^{-1} \sim 1.9 \times 10^{-4}$	$^{55}\text{Fe}, ^{54}\text{Mn}$
		10 years	4.0×10^5	$3.7 \times 10^{-2} \sim 1.8 \times 10^{-5}$	$^{55}\text{Fe}, ^{60}\text{Co}$
Shielding	Heavy concrete	0		$3 \times 10^{-2} \sim 1.5 \times 10^{-8}$	$^{51}\text{Cr}, ^{55}\text{Fe}, ^{59}\text{Fe}, ^{58}\text{Co}, ^{56}\text{Mn}$
		1 month		$2 \times 10^{-2} \sim 6.4 \times 10^{-9}$	$^{55}\text{Fe}, ^{51}\text{Cr}, ^{58}\text{Co}$
		1 year		$7 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-9}$	$^{55}\text{Fe}, ^{54}\text{Mn}$
		10 years		$7 \times 10^{-4} \sim 8.7 \times 10^{-11}$	^{55}Fe
Toroidal magnet	S.S.	0		$1 \times 10^{-5} \sim 4.5 \times 10^{-15}$	$^{58}\text{Co}, ^{56}\text{Mn}$
		1 month		$5 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-15}$	$^{58}\text{Co}, ^{55}\text{Fe}, ^{54}\text{Mn}$
		1 year		$1 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-15}$	$^{55}\text{Fe}, ^{54}\text{Mn}$
		10 years		$7 \times 10^{-7} \sim 1.4 \times 10^{-16}$	$^{55}\text{Fe}, ^{60}\text{Co}$
	Copper	0		$1 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-12}$	$^{64}\text{Cu}, ^{66}\text{Cu}$
		1 month		$2 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-20}$	^{60}Co
		1 year		$1 \times 10^{-7} \sim 2.6 \times 10^{-21}$	^{60}Co
		10 years		$5 \times 10^{-8} \sim 8.0 \times 10^{-21}$	^{60}Co

ャートの中で共通している処理について説明する。

減容化処理を行う理由は、輸送コストおよびパッケージングコストを抑えることにある。しかし、処分地がオン・サイトかオフ・サイトか、処分方法が陸地保管か地中処分かにより、減容化の程度を検討する必要がある。減容化とは、金属を切断、プレス、熔融したり、コンクリート等を粉砕化することをいう。

切断するためには、トーチ切断、カッタ、グラインダ、シャー、鋸などがあり、粉砕するためには、爆破、打撃破碎、削岩機はつり等がある。これらの作業に伴って、塵埃や有毒なガス（例えば、一酸化窒素、二酸化窒素、一酸化炭素など）が生じるので、高性能フィルターを備えた換気装置を有する遮蔽構造のホット・セルに類した密閉室が設備されなければならない。また切断する対象によっては、水中で行う方が良い場合もあり、ERRの炉内構造物の切断作業で用いられたような水中プラズマアーク切断装置が有用である。水中で行うと、放射線遮蔽、塵埃防止、換気装置の容量が少なくすむなどのメリットがある。また、水中に飛散した切粉は、特別な浄化装置により濾過し回収できる。しかし、空気中に比べかなり作業能率は落ちると予想されるので、大量の処理には不便である。

パッケージング処理に関しては、キャスクまたはボックスとして、木製、コンクリート製、金属製がある。これらは、処分地、処分方法、あるいは比放射能によって、当然選択されなければならないが、高レベルの放射能をもつ核融合炉の各コンポーネントの輸送用キャスクとしては、金属製を用い、厳しい管理のもとにパッケージングされるべきである。

次に各コンポーネント別の処理方法を述べる。

① ブランケット

Fig. 7.1 に放射化されたブランケットの処理工程を示す。第1壁表面には、かなりのトリチウムが付着、溶解していると考えられるので、ベーキングを行い、遊離したトリチウムを排気回収する。次に Li_2O の焼結体を他の構造材と分け、再使用する場合には、その処理を行う。薄いステンレス鋼板やパイプは、細かく切断し、プレス等により減容圧縮する。そして、輸送に適したパッケージングを行う。パッケージング方法については、核分裂炉や再処理施設で行われている方法に準ずる。

② 遮蔽体

これは、重コンクリート、ステンレス鋼板、鉛板から成っており、重量の大部分は重コンクリートで占められている。処理工程はFig. 7.2の通りであり、トリチウム除去の処理や再使用材料の回収処理が不要なので単純である。しかし、遮蔽体の場合、重コンクリート層はステンレス鋼でライニングされているので、外皮をはがし、中のコンクリートを粉砕化する方法が要求される。

コンクリートの中には、ボロン水冷却配管が埋め込まれているので、コンクリートを粉々にして取り除いた後、それらが残る。そして、それらとはじめにはがしたステンレス鋼板や鉛板は細かく切断され、減容化及びパッケージング処理される。

また、粉砕されたコンクリートも、キャスクやボックスに詰め込み、セメントあるいはアスファルトで固化する方法が適していると思われる。

但し、Table 7.1 に示しているように9000トンもの重量になるので膨大な数のキャスクが

生じる。

③ トロイダルコイル

トロイダルコイルは、コイルとキャンを形成する薄いステンレス鋼板から成っているが、区分する必要がないので、両者一緒に減容化、パッケージング処理を行う。

トロイダルコイルの比放射能は、ブランケットや遮蔽体に比べ低いが、核種が ^{60}Co であるから長期間貯蔵してもなかなか比放射能が下がらないという特徴がある。

④ その他

他のコンポーネントとして、中性粒子入射装置、リミッタ、真空ポンプがあるが、詳細な誘導放射能分布がわからないため省略する。

またトロイダルコイルについても、他のコンポーネントほどには強く放射化されないという理由から、問題は少ないと考えられる。

(iii) 処分方法

核融合炉から生じた放射性廃棄物は、高レベルと考えられるため、高レベルの海洋投棄処分が世界的に禁止されている事情から、陸地処分になるであろう。

一般に陸地処分の定義として、放射性廃棄物を地表面近くの浅地層中に直接埋設する処分法を地中処分、地表あるいは、地表面下に構築した構造物中に廃棄物を保管する方法を陸地保管、両方含めて陸地処分といわれている。

具体的に核融合炉の場合の検討を行うと、Fig. 7.3のようなフローチャートができる。実験炉の場合、10年間運転した後廃棄することになるが、建設の段階からそのことを考慮したB-1案が有力と思われる。一方、動力炉の場合、全国各地に立地すること、寿命が30年ぐらい、炉室及び他の付属施設が非常に広い、などの理由により、敷地の再使用ができないB-1案は不適当と思われる。

いずれにしても、この処分方法は、処分地がオン・サイトかオフ・サイトか、比放射能が高いか低いか、核種がどのような特徴を持つか、トータルコストの経済性、長期的な安全性、狭い国土、国民感情などによって、最終的な決定がなされなければならない。

(V) 問題点

以上、放射性構造物の廃棄処理方法を概念的に述べたが、いくつかの問題点があるのでとりあげる。

Table 7.1に示されているように、核融合炉は核分裂炉と比較して、非常に大量の廃棄物が発生する。材料、強度、形状などあらゆる方面から再検討し、いかに廃棄物の量を少なくするか見直す必要がある。

次に、廃棄物処理の過程で最も困難と考えられるのは、遮蔽体として使用されている複雑形状の重コンクリートの解体であり、減容化の点からも粉碎が必要と考えられるが、そのためにはあらかじめ破壊工学を考慮した設計製作方法が必要である。

さらに、処分後の崩壊熱の問題がある。場合によっては、ドラム缶を並べる間隔を広げたり、あるいは強制的に冷却を行うなどの処置が必要となるケースも考えられる。長期間の地中処分、陸地保管を想定した詳しい熱解析が待たれる。

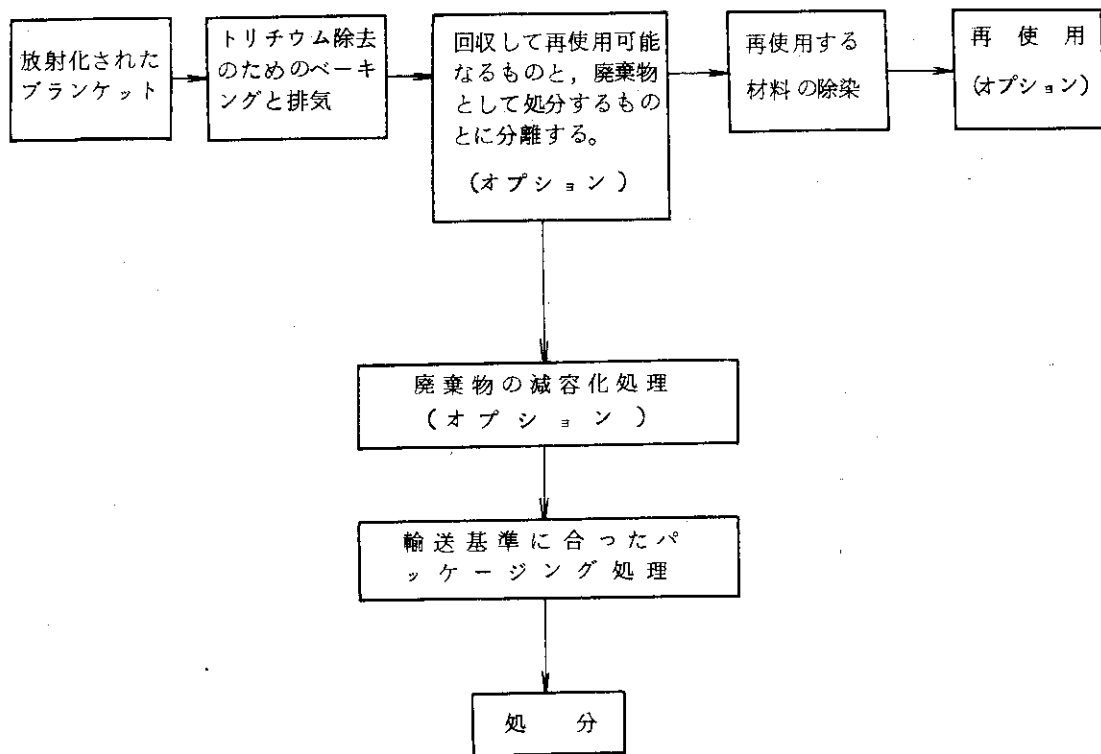


Fig. 7.1 放射化されたブランケットの処理工程

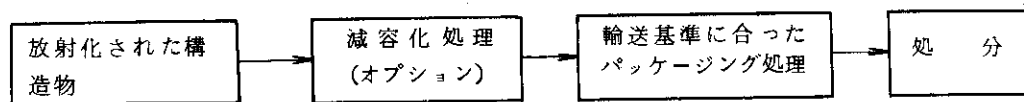


Fig. 7.2 放射化された構造物の処理工程

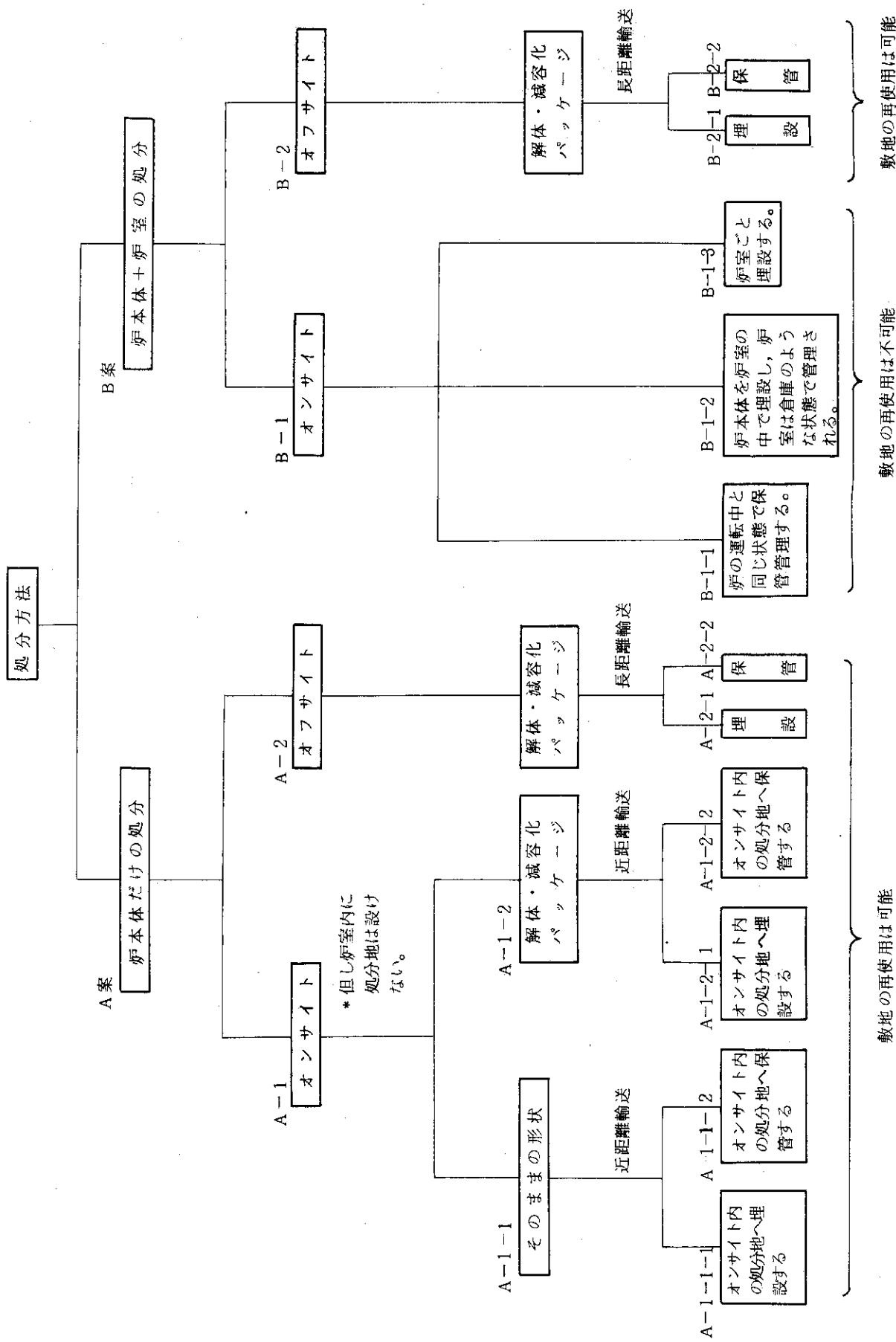


Fig. 7.3 核融合炉放射性廃棄物処分方法

参考文献

- 1) Kaser, J., D., Postma, A., K. and Bradly, D., J., CONF-760935-17 (1976)
- 2) 炉設計研究室 : JAERI-M 7300 (1977) 9月
「核融合実験炉第一次予備設計」 p 227 ~ p 230
- 3) 「原子力工業」 Vol. 22 No 4 APR, 1976 日刊工業新聞社

8. ま と め

8.1 分解修理所要時間と人員

1.2.2項で述べた「分解修理手順」に従い、炉の停止から再度稼動するまでの時間を推定した。ここでは、Table 1.10「ブランケットの分解修理手順」について検討するに留め、Table 1.9「ポロイダルコイル円筒部の分解修理手順」については触れない。最後に所要人員を検討した。また1日の労働時間は、24時間とした。

(1) 冷却管及び電気系統の解除

炉の停止後、1日から1週間主冷却系の低流量循環を行いながら炉を放置しておき、その期間中に故障箇所の見及及びその原因等を究明する。

次に、故障した炉モジュールを取り出すため、関連する冷却管及び電気系統の結合解除を行わなければならない。対象として次のような箇所がある。

- ① 故障した炉モジュールと外部との結合
- ② 上下部大径ポロイダルコイルをフリーにするための結合
- ③ NBI と外部との結合

冷却管と電気系統については、その結合構造及び数等いずれも明確ではなくその解除にどの位の時間を必要とするかほとんど不明である。

ここでは、とりあえず5日程度と推定する。

以下、必要な冷却管及び電気系統の解除がすべておこなわれたものとして検討する。

(2) NBI 移動

NBI を移動するための作業として次のようなものがある。

- ① NBI と遮蔽壁との機械的結合の解除
- ② 台車固定用アンカーボルトの解除
- ③ 台車ウェッジの解除
- ④ 台車駆動装置取り付け
- ⑤ NBI 修理室までの移動
- ⑥ 遮蔽壁開口部遮蔽取り付け

(i) NBI と遮蔽壁との機械的結合の解除

この結合機構は明確ではないが、ボルト結合として約4時間程度で結合部の解除を行うものとする。

(ii) 台車固定用アンカーボルトの解除

M400ボルトが8本であるので、1本に1時間とすると合計8時間である。左右同時に作業すると4時間で作業完了する。しかし、その他の作業も含めここでは5時間程度と推定する。

(iii) 台車ウェッジの解除

台車の車輪は、10個である。各車輪に2個ずつのウェッジがあるので、合計20個のウェ

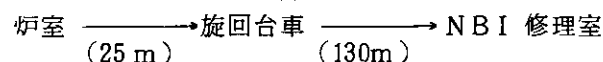
ッジを解除しなければならない。1個につき30分でその作業ができるものとする、延べ10時間必要である。左右から同時に作業するものとする、この解除作業には5時間必要となる。

(IV) 台車駆動装置取り付け

台車駆動装置は、ウェッジの解除作業と平行して行う。

(V) NBI 修理室まで移動

台車の走行行程を示すと次のようになる。



走行速度は、20 mm/sec であるのでこれに要する時間は、

$$H_1 = \frac{(25 + 130) \times 10^3}{20 \times 60 \times 60} = 2.2 \text{ hr}$$

となる。途中旋回台車の移動に約1時間、その他扉の昇降等の動作もあるので、ここでは、約4時間を要するものと推定した。

(VI) 遮蔽壁開口部遮蔽蓋取り付け

NBI を移動した後できる遮蔽壁側の開口部に遮蔽蓋を取り付ける作業であるが、ここでは、NBI の移動と平行して作業を行うものとする。

したがって、NBI を炉室から修理室まで移動するのに要する時間は次のようになる。

$$H = 4 + 5 + 5 + 4 = 18 \text{ hr} \approx 1 \text{ 日}$$

(3) 下部大径ボロイダルコイルのジャッキダウン

作業としては、次のようなものが考えられる。

- ① 引出用台車間のブラケット解除
- ② ジャッキダウン
- ③ ブラケット取り付け
- ④ レール保護板取り付け

(i) 引出用台車間のブラケット解除

ブラケット個数は5個である。1個につき1時間とすると合計5時間程度かかると推定される。

(ii) ジャッキダウン

大径ボロイダルコイルは、かなり大きなリング状のものでありその構造上局所的な応力がかかるのを嫌うものと考えられ、ジャッキダウンは互いに同期させるのはもちろん速度もゆっくりしたものと考えられる。ここでは、ジャッキダウンに4時間程度かかるものとする。

(iii) ブラケット取り付け

(i)の逆の作業であるが、同様に5時間とする。

(iv) レール保護板取り付け

保護板の数は16個、1個につき1時間とすると延べ16時間である。左右同時に作業する

ものとする合計8時間位と推定される。

したがって、下部大径ポロイダルコイルのジャッキダウンには、

$$H = 5 + 4 + 5 + 8 = 22 \text{ hr} \approx 1 \text{ 日}$$

程度必要と推定する。

(4) 上部大径ポロイダルコイルの吊り上げ
作業として、次のようなものが考えられる。

- ① クレーン玉掛け
- ② 炉体と機械的結合解除
- ③ ポロイダルコイルの吊り上げ固定

下部大径ポロイダルコイルと同様1日位必要と推定する。下部大径ポロイダルコイルの作業は作業車により行い、上部大径ポロイダルコイルはクレーンとゴンドラによって行うので、作業は平行して行うものとする。

(5) トロイダルコイル解除

故障した炉モジュールのトロイダルコイル2個と残留部との結合を解除する作業であるが、作業内容として次のようなものがある。

- ① トロイダルコイルの間の機械的結合の解除
- ② トロイダルコイルと円筒ポロイダルコイルの真空シール解除
- ③ トロイダルコイルの半径方向への移動

構造上不明であり、その作業の必要とする時間を割り出すのは困難であるが、ここでは、1日位を要するものと推定する。

(6) 炉モジュールの移動

故障した炉モジュールを総合分解組立室まで移動するのに必要な時間を推定する。作業としては、次のようなものがある。

- ① 炉モジュール間の機械的結合の解除
- ② 真空シール解除
- ③ 台車固定用アンカーボルトの解除
- ④ 台車ウェッジの解除
- ⑤ 駆動装置取り付け
- ⑥ 修理室までの移動

(i) 炉モジュール間の機械的結合の解除

鉛遮蔽ブロックとボルトの解除作業である。その数は、片側40個で合計80個である。1ブロックを解除するのに30分要するものとする、延べ40時間必要である。上部はゴンドラにより、下部は作業車により同時に作業するものとする。したがって、この解除作業には約20時間程度必要なものと推定される。

(ii) 真空シール解除

切断機により真空シールの切断を行う作業である。切断機の走行速度は200 mm/minであり、遮蔽壁外周約30mであるので、切断にかかる時間は、次のように推定される。

$$H_1 = \frac{30 \times 10^3}{300 \times 60} = 2.5 \text{ hr}$$

切断機がもってきた道を引きかえすのに要する時間は、その走行速度が約 10 m/min であるので、 $H_2 = 30 / (10 \times 60) = 0.05 \text{ hr}$ となる。

真空シールの解除は、炉モジュール側面の両サイドあるが、2台の切断機により同時に作業をすすめるものとする。

したがって、真空シールの解除に要する時間は、 $H = H_1 + H_2 = 2.55 \text{ hr}$ となる。しかし、切断機の取り付け取りはずしにかかる時間を考慮すると、合計 5 時間程度を要するものと推定する。

(iii) 台車固定用アンカーボルトの解除

M 400 ボルトが 6 本であるので、1本に 1 時間を要すると合計 6 時間となる。左右同時に作業をすすめるものとするとして 3 時間となる。しかしその他の作業も含め、ここでは 4 時間を要すると推定する。

(iv) 台車ウェッジの解除

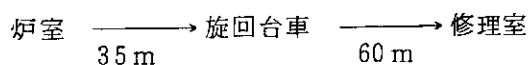
台車の車輪数 34 個、1 個の車輪につき 2 個のウェッジがあり、ウェッジの合計数は 68 個となる。1 個につき 30 分程度必要とすると、延べ 34 時間を要する。2 台の作業車により作業すると、ウェッジの解除には、17 時間を要するものと推定される。

(v) 駆動装置取り付け

駆動装置の取り付け作業は、ウェッジの解除作業と平行して行う。

(vi) 修理室まで移動

台車の走行行程を示すと次のようになる。



走行速度は、20 mm/sec であるので、 $H = \frac{(35 + 60) \times 10^3}{20 \times 60 \times 60} = 1.3 \text{ hr}$ となる。

途中旋回台車の移動に、最大約 1 時間を要し、この他に遮蔽扉の開閉等の動作もあり、これらを含め合計 6 時間程度と推定する。

したがって、遮蔽壁の機械的結合の解除から炉モジュールを修理室へ移動するまでに要する時間は次のようになる。

$$H + 20 + 5 + 4 + 17 + 6 = 52 \text{ hr}$$

合計 3 日程度必要と推定される。

(7) 推定所要人員

以上、推定所要時間につき検討したが、ここで人員につき検討する。

(i) 冷却管及び電気系統の解除

この作業は、人間による作業が可能である。作業内容等不明確であるが、1 モジュールに 2 人かかるものとする、8 モジュール分で、16 人により作業が行われる。この他に、ク

レーンに1人とすると、所要日数が5日であるので、次のようになる。

$$17 \text{ 人} \times 3 \text{ shift} \times 5 \text{ 日} = \text{延べ} 255 \text{ 人} \cdot \text{日}$$

(ii) NBI 移動

推定所要時間の項で述べた作業項目のうち次の作業については、人間が炉室内に入ることが可能である。

- ① NBI と遮蔽壁との機械的結合の解除
- ② 台車固定用アンカーボルトの解除
- ③ 台車ウェッジの解除
- ④ 台車駆動装置の取り付け

1つの作業を4人で行うものとする、延べ16人・日必要とする。

(iii) 下部大径ポロイダルコイルのジャッキダウン

NBI 移動後、遮蔽壁開口部に遮壁蓋を取り付けるのでこの作業も人間による作業が可能である。

引出用台車ブラケット解除作業に4人、ジャッキダウンには人間による作業は必要ない、ブラケット取り付けに同じく4人、レール保護板に4人とすると、延べ12人・日必要と推定される。

(iv) 上部大径ポロイダルコイルの吊り上げ

クレーンに1人必要である。したがって、3人・日と推定する。

(v) トロイダルコイル解除

構造上不明確であるが、10人・日程度と推定する。

(vi) 炉モジュールの移動

炉モジュールの機械的結合の解除後は、遮蔽壁の遮蔽が取りのどかれるので人間による作業は不可能である。

したがって、ここでは機械的結合解除にクレーンの人数も含め $5 \text{ 人} \times 3 \text{ shift} \times 1 \text{ 日} = 15 \text{ 人} \cdot \text{日}$ 程度と推定する。

(8) まとめ

以上、炉モジュールの分解に要する時間を推定した。組立て作業は、分解作業と逆の順で行うものとしても、組立て精度の調整等の問題から分解に比較してかなり多くの日数を必要とするものと考えられる。分解において、冷却管及び電気系統の解除から炉モジュールの移動まで11日の日数を必要とする。ここで、組立てに要する時間は分解に要する時間の1.5倍程度必要とすると、組立てに要する時間は約15日必要である。

組立て後の検査に要する時間は、検査方法等明確ではないが、炉構造の複雑さから約20日位の期間を必要とするものと推定する。

又、検査の後、炉の試運転等も必要と考えられ、これに要する時間を7日間程度とする。

Fig. 8.1 は、これらをもとに炉の停止から再運転までに要する推定所要日数と作業の関係を示したものである。

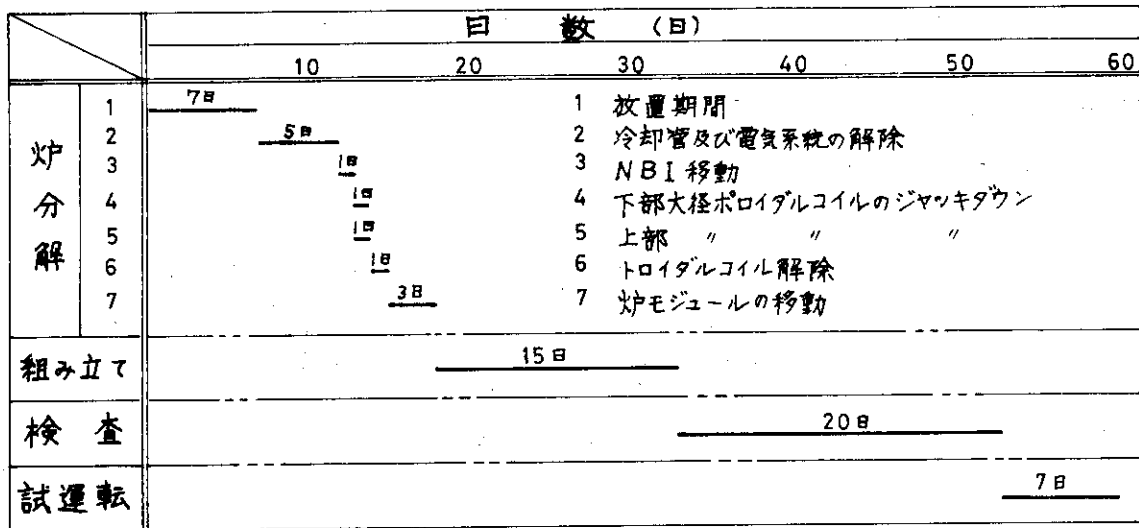


Fig. 8.1 炉停止から再運転までに要する推定所要日数

放置期間は、最高の7日間を記入した。

このように、炉の異常発生から炉モジュールの解体、そして炉モジュールスペアの組込みを経て炉の再運転までに要する日数は約2ヶ月程度と推定される。

推定所要人員について検討したが、表にすると Table 8.1 のようになる。

Table 8.1 推定所要人員

作 業 項 目	人 員
冷却管及び電気系統の解除	255 人・日
NBI 移動	16 人・日
下部大径ポロイダルコイルジャッキダウン	12 人・日
上部 " "	3 人・日
トロイダルコイル解除	10 人・日
炉モジュール移動	15 人・日
合 計	311 人・日

炉の稼働率を考える上で、炉の故障頻度及び故障箇所については、1.2「分解修理システム」の項より次のようになる。稼働率については10年単位で考慮する。

- ① 高頻度(1年に1回故障)
 - ・中性粒子入射加熱装置
 - ・メカニカルリミッタ
- ② 中頻度(2~3年に1回故障)
 - ・ブランケット容器

④ 低頻度（10年に1回故障）

- トロイダルコイル
- ポロイダルコイル
- 真空系内の配管類
- 遮蔽壁

高頻度のものについては、故障しても炉を分解せずに独立して修理可能なように設計構造が要求されているので、炉の稼働率に対する影響はない。

中頻度のものについては、10年に5回故障すると仮定する。したがって、修理に要する日数は、2ヶ月×5回＝10ヶ月となる。

低頻度のものについては、例えば、トロイダルコイルと真空系内の配管類がそれぞれ10年に1回ずつ故障するものと仮定する。修理に要する日数は、2×2ヶ月＝4ヶ月となる。

したがって、この場合の炉の稼働率は次のようになる。

$$\eta = \frac{10 \times 12 - 10 - 4}{10 \times 12} = 0.88$$

しかし、この他に定期点検又は予期せぬ炉の故障による炉の停止等が考えられ、炉の稼働率はもっと低くなると考えられる。炉の故障頻度も確信のあるデータではなく予測である。したがって、ここでいう稼働率はあくまでも推測の域を出ない。

以上、分解修理に要する日数、人員、及び稼働率を検討したが、将来核融合炉の実現化を測る上で、分解修理に要するこれらの日数等について詳細検討をする必要がある。

8.2 問題点及び開発課題

(1) 問題点

炉の分解修理のため、炉の確体を容易にするための炉構造を要求することに伴い発生する問題点として次のようなものがある。

- ① 放射線遮蔽壁のモジュール化に伴う問題点
 - モジュール化したための強度の低下
 - モジュール取り付け時の精度の問題
- ② 炉モジュールを台車に乗せていることに伴う問題点
 - 炉の耐震強度の低下
- ③ 旋回台車に伴う問題点
 - 車輪方式
 - ・正確な円軌道を保たせるための加工精度の問題
 - ・レール面精度を出すための据付の問題
 - エア-ベアリング方式
 - ・床面精度の問題
- ④ ブランケット冷却配管に伴う問題点
 - ブランケット支持脚との取合いの問題
- ⑤ パイプ結合方法に伴う問題点
 - 溶接法……解体組み立てが容易でない
 - フランジ法……メタルOリングの長期的な信頼性

(2) 開発課題

核融合炉の分解修理を行う上で、開発しなければならない項目をあげた。

- ① 開発しなければならないもの
 - (i) マニピュレータ

炉室内で作業できるような、多機能、多自由度、及び高精度なマニピュレータの開発
 - (ii) 自動切断・溶接機

炉モジュール真空シール部の切断及び溶接を行うための自動切断溶接機の開発
 - (iii) TVカメラ

放射能高レベル空間で監視及び検査に使用するためのTVカメラの開発
 - (iv) 溶接部検査方法

うすいオーステナイト系ステンレス鋼板の溶接部に関する非破壊検査方法の確立
 - (v) メタルOリングの開発

パイプ及びその他の結合箇所使用するメタルOリングの長期的信頼性の面からの開発
 - (vi) 配管自動溶接機

狭い空間で信頼性のある溶接ができる自動溶接機の開発

8.3 結 語

炉体を円周方向に分割し、外部に引き出し修理する方式について検討を行った結果、一連の分解修理手順が明確になり、本方式によりあらゆる部分の故障修理に対応できることが原理的に確認された。

分解修理作業および作業に要する設備、所要時間等について詳細な検討がなされた。建屋および放射性廃棄物処理についても、全般的な検討がなされた。また、実験を通じて本方式の信頼性を高めることが必要であり、問題点、開発事項に関する提起を行った。

しかしながら、分解・修理方式の設計は、炉本体の設計と密接に関連した問題であり、炉本体の設計が並行して行われている現状では、検討資料不足の面も多々あり、さらに詳細な検討を行うには炉本体の設計が進んだ時点での見直しが必要となろう。

なお、炉本体の構造に関して原研では Fig. 1.2 (JAERI-M 7300 に掲載) を概念設計しているが、本分解修理設計で検討した結果、Fig. 8.2 「炉モジュール断面図」のような構造となった。

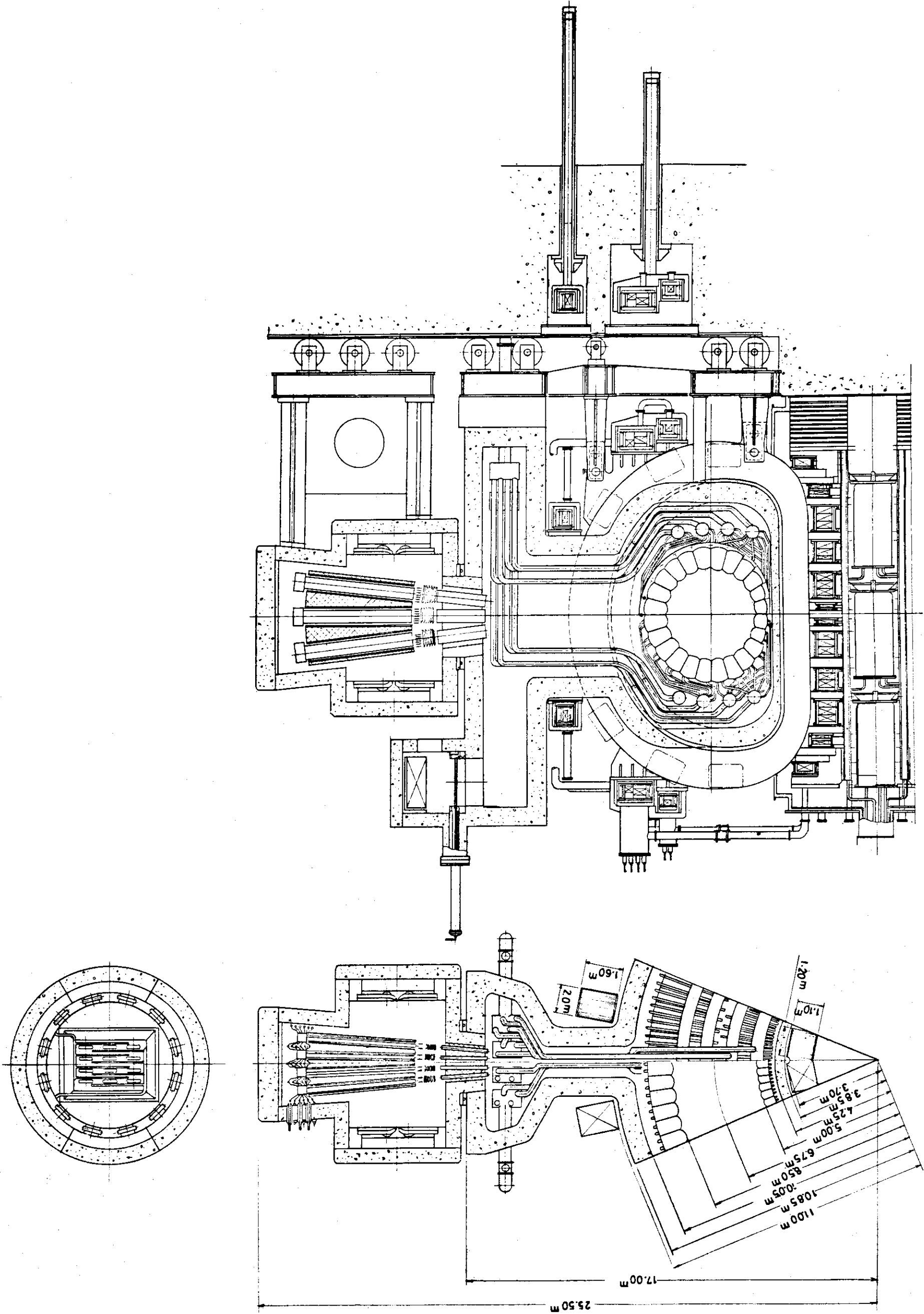


Fig. 8.2 炉モジュール断面図

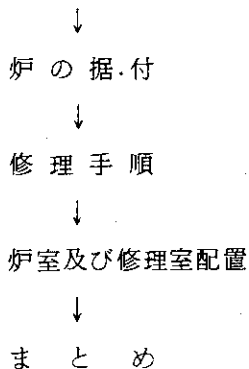
9. 追補 (その他の修理方法)

(1) 概要

本文においては、マグネット付の炉モジュールを炉体から解体し修理室において故障箇所の分解及び修理を行うという方法について検討した。炉の修理には、この方法に限らず、その他の方法でも修理可能なものがあると考えられる。

ここでは、本文で検討した方法以外の種々な方法を列記し、その可能性について検討してみる。ブランケットの故障頻度がマグネットに比較し相当高いものと仮定すると、ブランケットの修理方法が炉の修理に対する大きな要因をしめると考えられる。ここでは、ブランケットの修理を主体とした修理方法を以下の項目に従い検討してみる。

ブランケット容器修理方式と可能性



(2) ブランケット容器修理方式と可能性

ブランケットの分解修理には、大別して次の様な方法が考えられる。

A ; ブランケット容器を遮蔽壁に設けた開口部から取り出す方法

B ; ブランケット容器を遮蔽付の状態に取り替える方法

Aの方法には、単位容器を開口部から取り替える方法とリング状ブランケットを取り替える方法とがある。前者は、配管付ブランケットなのでその作業に難がある。後者は、マグネットの間から引き出すため大きな開口部を要しマグネットのボアを大きくせざるをえないことに問題がある。

Bの方法には、Fig. 9.1の様なことが考えられる。

(B-1-1)では、遮蔽がマグネットの外側にある状態の時に考えられる方法である。本炉は遮蔽がマグネットの内側にあるので不可能である。

(B-1-2-1)では、マグネットの間から引き出すため大きな開口部を要しマグネットのボアを大きくせざるをえないことに問題がある。

(B-2-1)では、本炉の構造ではポロイダルコイルとトロイダルコイルの真空容器が1体化されているので大きなメリットがあるとは思えない。又、現状の構造では内側のトロイダルコイルと遮蔽の間隙が少ないので周方向に動かすことも不可能である。

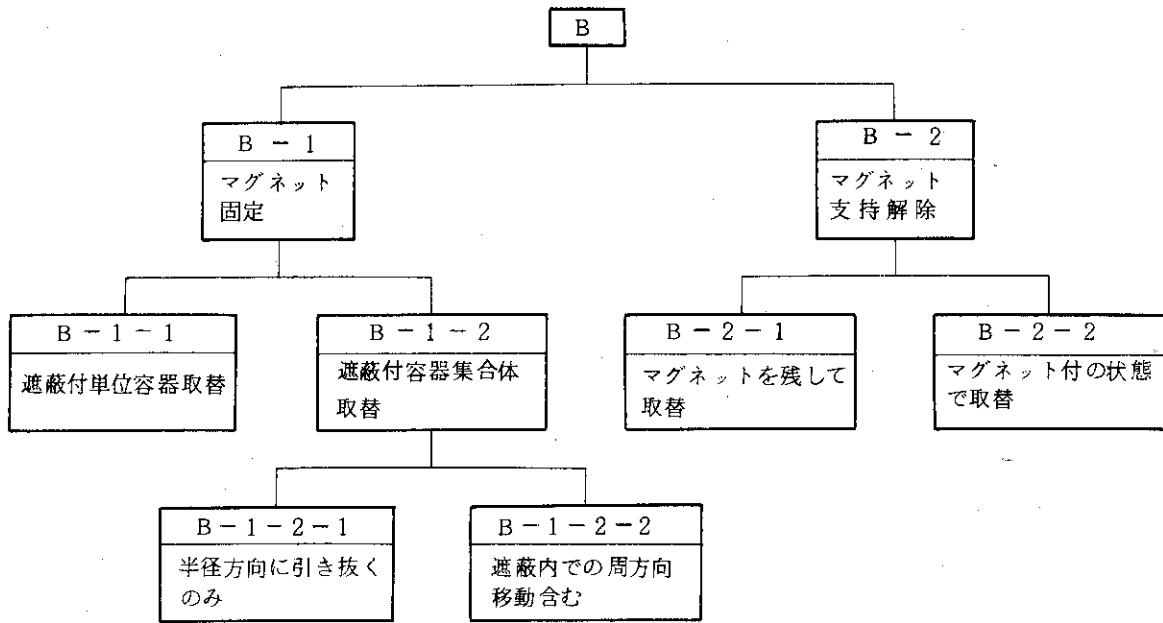


Fig. 9.1 ブランケット容器を遮蔽付の状態を取り替える方法

(B-2-2)は、本設計で採用したものである。
 ここでは、(B-1-2-2)について検討してみる。
 次の様な2通りの方法が考えられる。

①

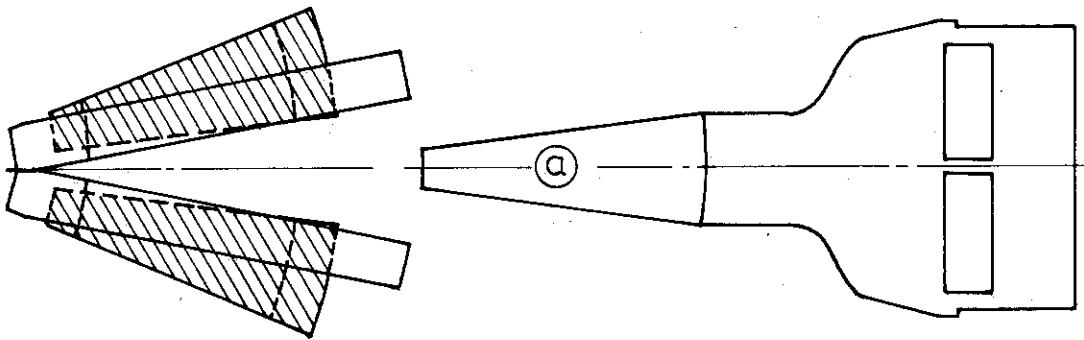


Fig. 9.2 B-1-2-2 第1案

Fig. 9.2 のような形状で引き抜く方法がある。

この方法では、引き抜く前に遮蔽内においてブランケット配管ヘッダーの切断作業を必要とする。対策としては、斜線部のブランケット配管を全く別系統にしてしまうか、図上のa部分の上下に作業用の開口部を設けるといった方法が考えられる。ここでは前記の方法は考えない。

次に問題点を述べる。

a) 遮蔽壁の結合部がほとんど全周トロイダルコイルの内側にあり、又、遮蔽壁とトロイダル

コイルの間隙が小さいため、シール溶接が困難である。同じく、機械的結合にも困難がある。
 b) Fig. 9.2 で示した斜線部に相当する遮蔽壁の支持が構造的に困難である。つまり、トロイダルコイル、ポロイダルコイル、及び、それらの機械的結合や支持脚等があり、斜線部の遮蔽壁のための支持脚を設けるスペースがほとんどない。

以上のように、遮蔽壁の支持がほとんど不可能であり、この方法は、可能性は薄いと考えられる。

㊦

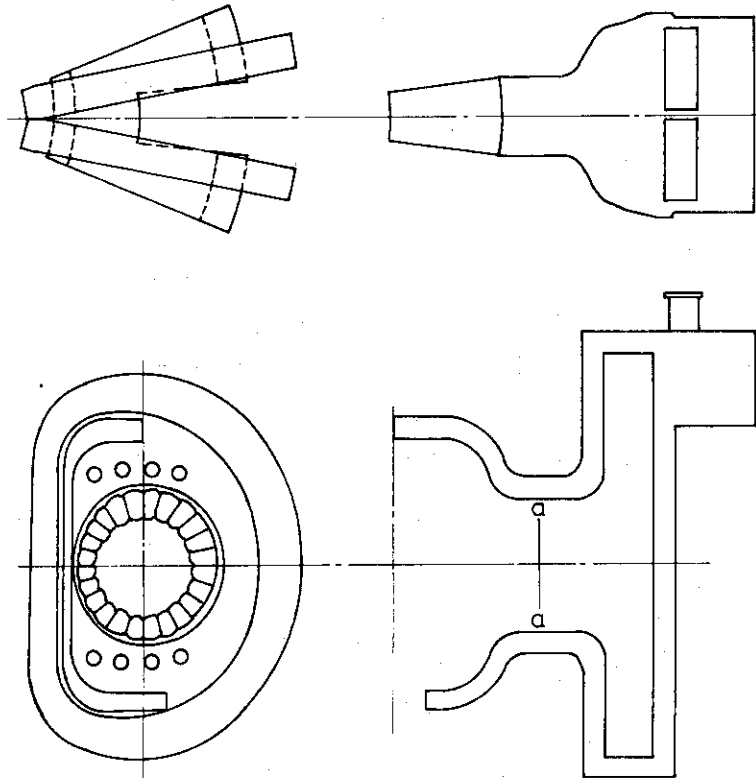


Fig. 9.3 B-1-2-2第2案

NBI を取り除いた後できる開口部より a-a 断面に相当する位置の主管を切断し、外側半分の遮蔽壁のみを移動する。遮蔽壁を移動した後できる炉体の開口部よりブラケットの解体に必要な作業を行いブラケットを炉体から抜き出す方法である (Fig. 9.3)。

天井クレーンにより解体する方法とすれば、炉体はすべて床に固定でき、台車方式に比較して炉自身に安定性が増し信頼性の向上が図れる。分割される部品も 2000 ton 程度でありクレーンによる作業が可能と考えられる。

以下、天井クレーンにより作業するものとして検討する。

本文の修理方法と比較して大きく変わるものとして、

- ① 炉の据付
- ② 修理手順
- ③ 炉室及び修理室の配置

等があげられる。したがって、これらの項目について検討し、最後にまとめとしてこの修理方法

に対する結論を述べる。

(3) 炉の据付

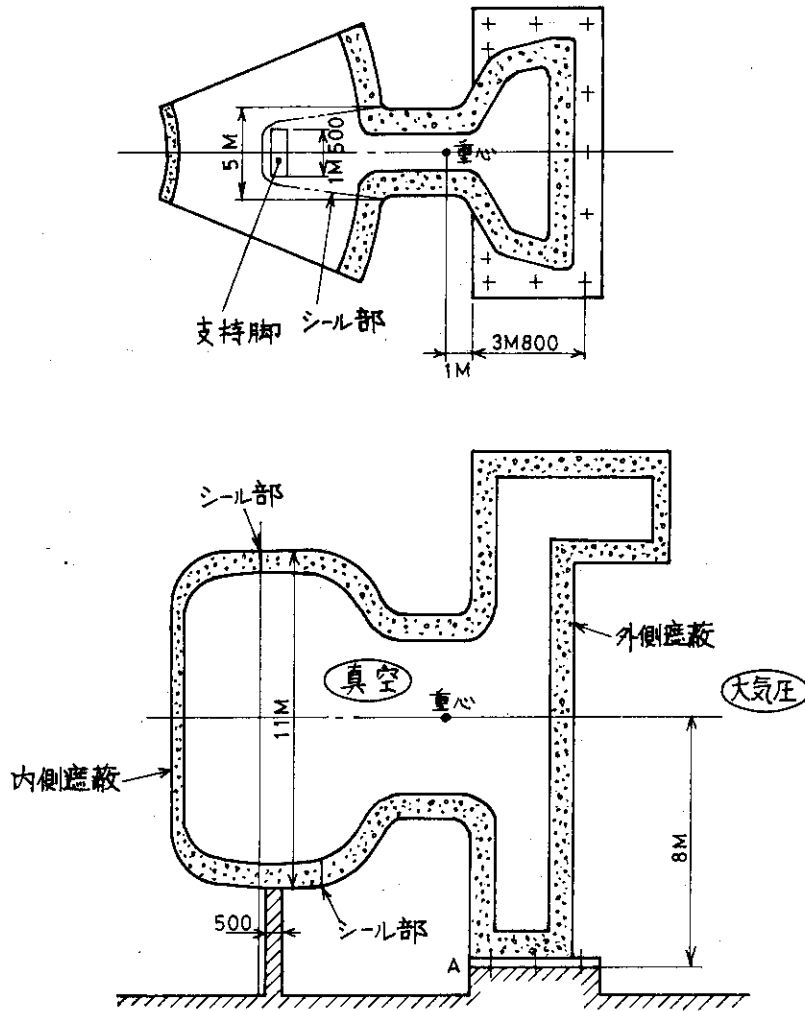


Fig. 9.4 炉の据付

Fig. 9.4 のような据付を考え、内外遮蔽壁はそれぞれ独自に支持されているものとする。外側遮蔽にかかる力は、内部を真空にするため大気圧による炉心方向への転倒モーメントが働らく。

シール部を外周とした炉心方向への投影面積は、

$$A = 3 \times 11 = 33 \text{ m}^2$$

となる。したがって大気圧による炉心方向への力は、

$$F_1 = 33 \times 10^4 = 330 \times 10^3 \text{ kg}$$

地震による力 $F_2 = 0.5 G = 0.5 \times 2000 = 1000 \text{ ton}$ の力が同時に働くものとする、自重による転倒モーメントを含め次のようになる。

$$M = (330 + 1000) \times 10^3 \times 8 + 2000 \times 10^3 \times 1$$

$$= 12640 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

となる。

図中のAを支点とすると、外側の5本のボルトに働く力は、

$$W = \frac{12640 \times 10^3}{3.8} = 3326 \times 10^3 \text{ kg}$$

M 300 のアンカーボルトを使用すると、ボルトの引っ張り応力は、

$$\sigma_b = \frac{3326 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 30^2 \times 5} = 941 \text{ kg/cm}^2$$

となる。ボルトの材料を SUS 材とすると許容引っ張り応力は約 1050 kg/cm^2 であるからこの引っ張り応力に対して満足する。

内側の遮蔽壁については、炉モジュール間が本文で述べた方法により互いに機械的結合されており大気圧による転倒モーメントは考えなくてよい。したがって、支持脚の圧縮応力について検討すると、

$$\sigma_a = \frac{1500 \times 10^3}{50 \times 150} = 200 \text{ kg/cm}^2$$

となり、SUS 材の許容圧縮応力に満足する。

NBI の据付方法を Fig. 9.5 に示す。この NBI も独立して支持されているものとする。NBI の重量は 931 ton である。NBI 部の固定を M 100 のボルトを 4 本用いるとする。また、NBI に関しては、転倒モーメントは考慮しなくても良いと考えられるので、地震時における基礎ボルトの剪断応力を計算する。

$$\tau = \frac{931 \times 10^3 \text{ kg} \times 0.5}{\frac{10^2 \pi \text{ cm}^2}{4} \times 4 \text{ 本}} = 1482 \text{ kg/cm}^2$$

SUS のボルトの許容剪断応力は、 1500 kg/cm^2 (短期の場合)とみなせるので、この値は満足する。

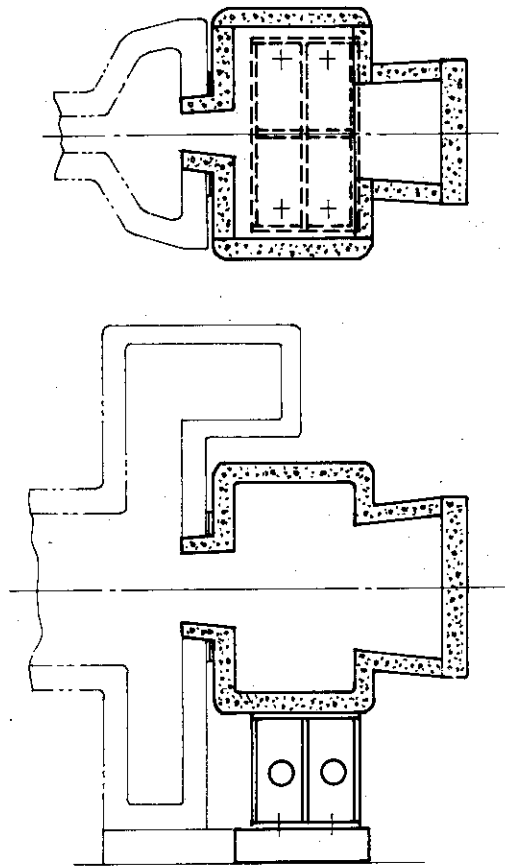


Fig. 9.5 NBI の据付

(4) 修理手順

① ブランケット

ブランケットの解体作業の手順を示すと Fig. 9.6 のようになる。

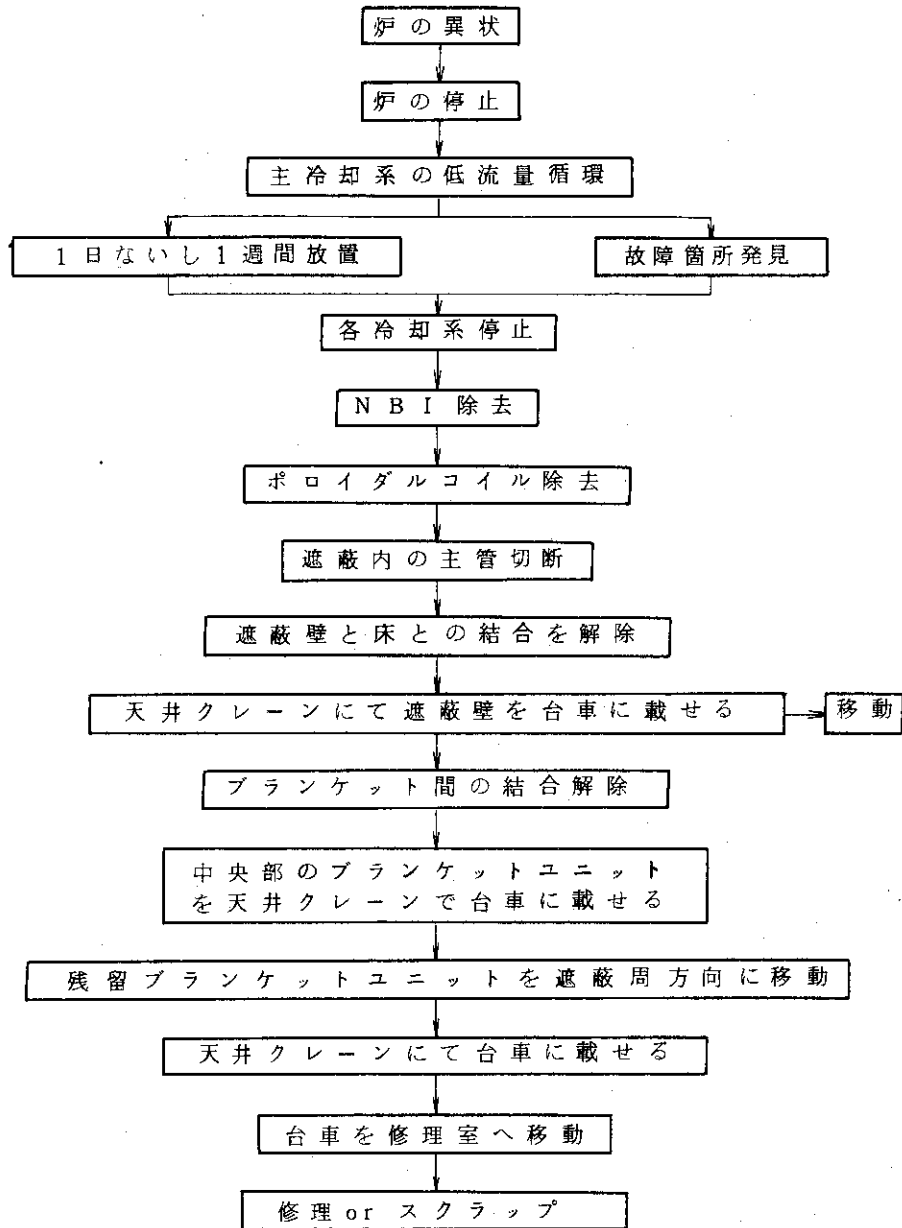


Fig. 9.6 解体手順

ブランケット組込み作業をほぼ解体の逆の順とみると、大略 Fig. 9.7 のようになる。

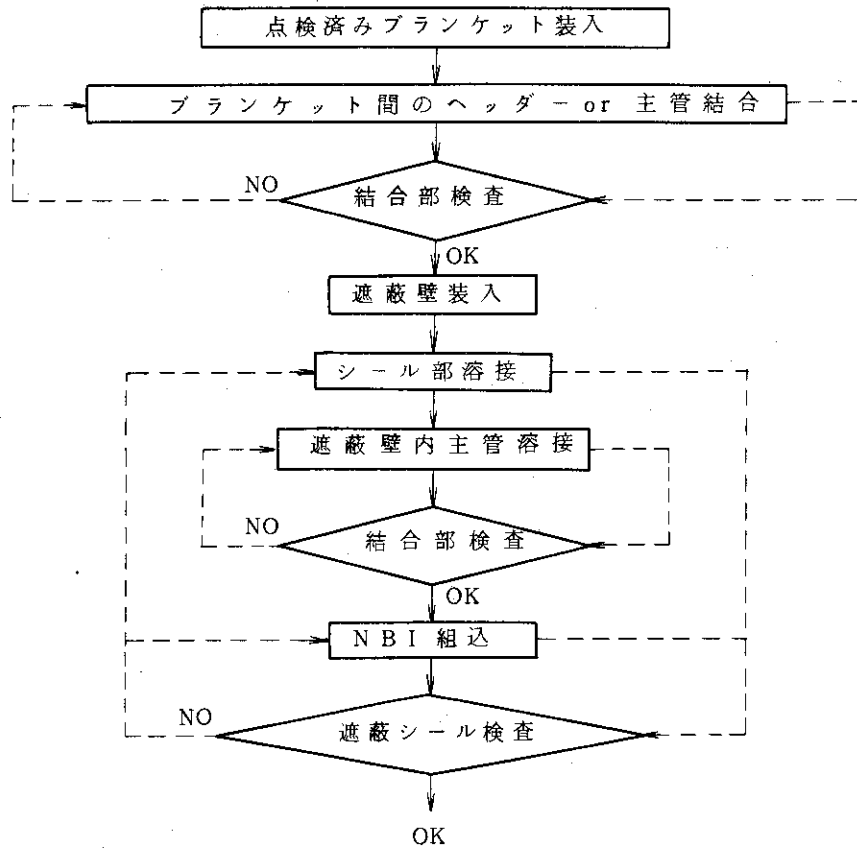


Fig. 9.7 組み立て手順

② トロイダルコイル

トロイダルコイルの解体手順は、ブランケットユニットを解体するまでは前記と同様である。ブランケットユニットの解体が終ると、次の作業を行わなければならない。

- トロイダルコイルとポロイダルコイルの結合部解除
- トロイダルコイル間相互の機械的結合
- 残留部の遮蔽壁と相隣る遮蔽壁との結合解除
- 床との結合解除

これらの作業終了後遮蔽壁とトロイダルコイルを1体で天井クレーンにて吊り台車へ載せる。台車に載せる以前に別の場所において遮蔽壁とトロイダルコイルは分離された方がよいと考えられる。台車に載せられたトロイダルコイルは、専用の修理室へ運ばれ適当な処置がなされる。

③ 円筒ポロイダルコイル

前述した解体方法により周囲の邪魔になるものはすべて別の場所へ移動し、その後本文で述べた解体手順によりポロイダルコイルを解除するものとする。

(5) 炉室及び修理室の配置

① 炉室

解体、組立て及び検査のための装置が作業するのに十分なスペースの確保が必要である。本文で述べた方法は、台車上の炉モジュールは台車を駆動することによりその移動を行ったが、ここでは、解体組立作業のための移動は主として天井クレーンによって行われる。

天井クレーンの吊り上げ荷重は、最大約 2000 ton 程度のものが必要である。この仕様については、昭和 51 年 12 月に、原研へ、当社より提出した核融合炉分解修理設計報告書において 2000 ton 用天井クレーンの設計例があり、ここでの説明は行わない。

運搬可能な作業装置等は、作業期間中以外は炉室外に設けられた専用の格納室に格納しておく。

炉室周りの旋回台車用の旋回軌道は当然不要である。

② 修理室

修理室においては、すでに解体された部品が搬送されてくるので、総合分解組立室や総合の検査室は不要になる。

室内の雰囲気管理については、本文のものと同様に嚴重に管理される必要がある。

炉室及び修理室の配置の概略を Fig. 9.8 に示す。

(6) まとめ

(i) 問題点

- ① モジュールの結合部がほとんど全周トロイダルコイルと重複しておりトロイダルコイルと遮蔽壁の間隙がほとんどない現在その結合に難がある。
- ② モジュール結合部の形状が複雑であり、そのシールの信頼性が欠ける。
- ③ トロイダルコイル解体のための結合部とブランケット解体のための結合部が存在しそれだけシール部が増すことになる。したがって信頼性が低くなる。
- ④ 炉室内での検査項目が増す。

(ii) 結論

検査項目の点から本文の修理方法と比較するのは困難であるが、例えば、本文の方法では炉モジュール組込み完成後炉体から露出した箇所のみ検査をすればよいが、この方法では組立工程の途中にも検査が必要である。現時点では、検査にかかる時間は明確ではないが、その作業にかなりの時間を要するものと思われる。又、検査が増せばそれだけ作業のやり直しの可能性が増すことになる。

遮蔽壁シールにおいても本文の方法に比較してその信頼性を欠く。

この方法は、マグネットの故障頻度がブランケットに比較してかなり低いと仮定した場合のみ有効であり、マグネットの故障頻度が高いようであれば必ずしもこの方法は有利でない。

したがって本文の修理方法はすべての分解修理の基本となり、現在最も有効な方法と考えられる。当面の修理設計においては本文のものを採用するが、将来は、9章で述べたような種々の修理方法についても再検討する必要がでてくるであろう。

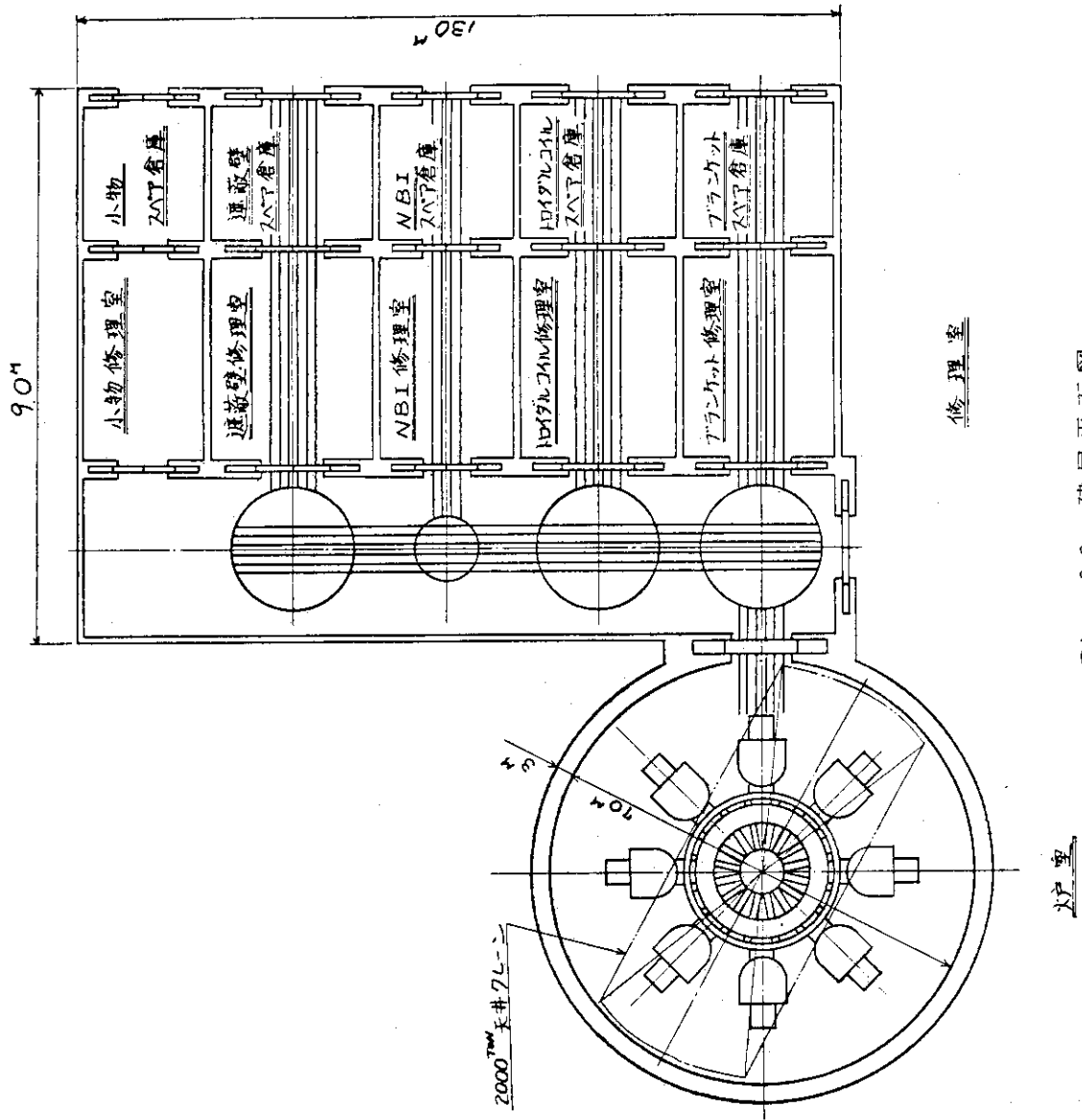


Fig. 9.8 建屋平面図

設計研究担当者

(1) 主たる設計研究者

住友重機械工業(株)

田島 豊, 山野内和樹
水口 忠良, 豊田英二郎

(2) 原研側担当

炉設計研究室

迫 淳