

JAERI-Tech  
95-034



タンデムブースターの開発と建設

1995年6月

加速器管理室

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)高野高速印刷

タンデムブースターの開発と建設

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
加速器管理室

(1995年5月25日受理)

原子力の基礎研究の1分野としての重イオン科学を推進する目的で、1982年に世界最高クラスのタンデム加速器が東海研究所に設置され、原子核物理、原子分子物理、固体物理および固体の照射損傷等の研究が始まった。しかし、タンデム加速器の特性として、加速される重イオンの核子当りのエネルギーは質量数の増加に対し反比例的に減少するため、原研のタンデムでは質量数が約70以上の重イオンに対しては核反応を起すのに必要なエネルギーに満たなくなる。そこで、タンデムの後段にブースターを付置することによって、このような重いイオンのエネルギーを2～4倍増強することを目的とした。

ブースターとしては当時急速に発展し実用化しつつあった超電導リニアックが魅力的であったので、その高周波超電導技術を米国アルゴンヌ国立研究所から取入れ、ニオブウムを用いた1/4波長型の超電導加速空洞の開発を行い、試作に成功した。ブースター本体の基本設計では、2周波数からなる超電導バンチャーでタンデムからの直流ビームを約60%パルス化し、10基のクライオスタットに収納された40台の超電導空洞からなるリニアックで加速し、超電導デバンチャーでエネルギーを揃え、90°電磁石でエネルギーを分析し、エネルギーの揃った連続的なビームをターゲット室へ導くこととした。

開発は、2台の超電導空洞からなるバンチャーとデバンチャーを作りビーム試験を行った後、1988年からブースターの本格的建設を進め、1993年にブースターの組立が完了した。1993～1994年にヘリウム冷却系試験、ビーム加速試験を行い、総加速電圧30MVという設計性能を達成し、塩素イオンから金イオンまでの代表的な重イオンの加速に成功した。

本報告書は、ブースターの開発の目的と経緯、ブースター本体の超電導加速空洞およびクライオスタット、RF制御系、ヘリウム冷却系、ビームライン等の設計、製作および性能、建家の建設とその設備、安全系の設計と設備、ビーム加速性能試験結果、そして、ブースターを使った原子核物理、固体物理の研究計画と実験装置について記載した。

Development and Construction of the JAERI Tandem-booster

Accelerators Division

Department of Reactor Engineering

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 25, 1995)

In 1982, a large tandem accelerators was installed in JAERI Tokai, and various research activities started in the fields of nuclear physics and chemistry, atomic and molecular physics, solid state physics and so on. The energy of heavy ions with a mass number larger than about 70 was, however, not enough for nuclear reactions. We intended to increase the beam energy of such heavy ions by a factor of 2 to 4 by installing a post accelerating booster.

A superconducting linac which was being successfully developed at that time was attractive for the booster. After learning the rf superconducting technology at Argonne National Laboratory, a prototype quarter-wave resonator made of niobium was build and brought out a good result.

The booster we have designed has a simple structure composed of a two frequency superconducting buncher which bunches 60% of the direct-current beam from the tandem, a linac with 40 superconducting quarter-wave resonators in ten cryostats, a superconducting debuncher which suppresses the energy spread and a beam-analyzing magnet. The beams from the booster are, then, direct current like continuous beams with small energy spread.

Two units for the buncher and the debuncher, each of which contained two superconducting resonators, were build and tested in the early stage of the development. The full scale construction of the booster began in 1988 and was completed in 1993. Operating tests of cryogenic system and beam acceleration tests were done in 1993 and 1994. The design value of 30 MV for the total accelerating voltage was attained. Typical heavy ions from Cl to Au were successfully accelerated.

In this report, described are the aim and history of the development, the design, fabrication and performance of the superconducting resonators, the cryostats, the rf control systems, the cryogenic systems and the beam transport lines, the building construction and equipment, the consideration of safety and safety equipment, the result of commissioning and the physics using the booster including experimental apparatuses.

Keywords : Tandem Accelerator, Booster, Superconducting Linac, Superconducting Resonators, Heavy Ion Acceleration, Energy Upgrade of 2-4 Times, Cryogenic System, Building, Safety, Physics Using the Booster

## 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 タンデム加速器建設からブースター開発へ .....	1
1.2 研究の発展 .....	2
1.3 開発予算および建設日程 .....	3
2. タンデムブースター .....	5
2.1 加速器本体 .....	5
2.1.1 概 要 .....	5
2.1.2 構 成 .....	6
2.1.3 超電導加速空洞 .....	6
2.1.4 ビーム光学 .....	11
2.1.5 バンチャー .....	13
2.1.6 加速ユニット .....	14
2.1.7 デバンチャー .....	16
2.1.8 ビーム診断系 .....	17
2.1.9 RF制御系 .....	19
2.2 ヘリウム冷却系 .....	54
2.2.1 はじめに .....	54
2.2.2 ヘリウム液化器 .....	55
2.2.3 ヘリウム圧縮機 .....	55
2.2.4 低温配管, 移送配管 .....	57
2.2.5 補助機器 .....	58
2.2.6 冷凍機制御装置 .....	60
2.3 ビームライン .....	71
2.3.1 はじめに .....	71
2.3.2 ビームハンドリング系 .....	71
2.3.3 ビームライン真空系 .....	72
2.3.4 電磁石機器 .....	73
2.3.5 ビームライン・ユーティリティー .....	76
2.3.6 ビームライン制御系 .....	77
3. 建 家 .....	98
3.1 ブースター建家 .....	98
3.2 建家の構成 .....	98
3.2.1 建家附属主要機器 .....	99
3.3 建家設備 .....	99

3.3.1	電気設備	99
3.3.2	給排水設備	103
3.3.3	窒素ガス・圧空・排気設備	104
3.3.4	空調設備	105
4.	安全系について	125
4.1	はじめに	125
4.2	施設の安全設計	125
4.2.1	放射線被ばく防止に関する安全設計	125
4.2.2	地震に対する安全設計	129
4.2.3	停電に対する安全設計	130
4.2.4	火災に対する安全設計	130
4.3	安全系設備	130
4.3.1	放射線インターロック	130
4.3.2	放射線エリアモニター	131
4.3.3	酸素濃度モニター	131
4.3.4	テレビモニター設備	132
4.4	変更許可手続き等	132
4.4.1	放射性同位元素等の許可使用に係わる変更許可申請	132
4.4.2	放射線装置室等設置変更届	133
5.	ブースターの性能	142
5.1	ブースター本体試験結果	142
5.1.1	加速ユニット空洞	142
5.1.2	ビーム加速試験結果	142
5.2	ヘリウム冷却系の性能	146
5.2.1	性能試験	146
5.2.2	負荷試験	148
5.2.3	問題点	149
6.	ブースターを使った研究	154
6.1	ブースターを使った原子核研究	154
6.1.1	反跳生成核分離装置	155
6.1.2	多重ガンマ線検出器	156
6.2	ブースターを使った固体物理の研究	160
6.2.1	高エネルギー重イオンと結晶原子との相互作用の研究	160
6.2.2	電子励起過程による照射損傷の研究	160
6.2.3	励起核を利用した格子欠陥の研究	160
7.	おわりに	163

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1 From the Construction of the Tandem Accelerator to the Development of the Booster .....	1
1.2 Progress of Research .....	2
1.3 Budget and Plan of the Construction .....	3
2. Tandem Booster .....	5
2.1 Accelerator System .....	5
2.1.1 Outline .....	5
2.1.2 Arrangement .....	6
2.1.3 Superconducting Resonators .....	6
2.1.4 Beam Optics .....	11
2.1.5 Buncher .....	13
2.1.6 Accelerating Units .....	14
2.1.7 Debuncher .....	16
2.1.8 Beam Diagnostics .....	17
2.1.9 RF Control System .....	19
2.2 Cryogenic System .....	54
2.2.1 Remarks .....	54
2.2.2 Helium Refrigerators .....	55
2.2.3 Helium Compressors .....	55
2.2.4 Transfer Lines .....	57
2.2.5 Support Apparatuses .....	58
2.2.6 Control System for Refrigerators .....	60
2.3 Beam Lines .....	71
2.3.1 Outline .....	71
2.3.2 Beam Handling System .....	71
2.3.3 Beam Line Vacuum System .....	72
2.3.4 Magnets .....	73
2.3.5 Beam Line Utilities .....	76
2.3.6 Beam Line Control System .....	77
3. Building .....	98
3.1 Outline .....	98
3.2 Building Arrangement .....	98
3.2.1 Building Apparatuses .....	99



3.3 Building Equipment .....	99
3.3.1 Electricity Supply .....	99
3.3.2 Water Supply and Drainage .....	103
3.3.3 Nitrogen Gas, Pressurized Air and Exhaust Lines .....	104
3.3.4 Air Conditioning .....	105
4. About Safety .....	125
4.1 Outline .....	125
4.2 Design of Safety in the Facility .....	125
4.2.1 Protection from Radioactive Ray Exposure .....	125
4.2.2 Protection from Earthquakes .....	129
4.2.3 Protection from Power Failure .....	130
4.2.4 Protection from Fire .....	130
4.3 Equipment for Safety .....	130
4.3.1 Radioactive Ray Interlock .....	130
4.3.2 Radioactive Ray Monitors .....	131
4.3.3 Oxygen Monitors .....	131
4.3.4 TV Monitors .....	132
4.4 Official Permission .....	132
4.4.1 The Change in Use of Radioactive Isotopes .....	132
4.4.2 The Change in Installing Radioactive Ray Generators .....	133
5. Performance of the Booster .....	142
5.1 Commissioning Results of the Accelerator System .....	142
5.1.1 Accelerating Resonators .....	142
5.1.2 Results of Beam Accelerating Tests .....	142
5.2 Commissioning Results of the Cryogenic System .....	146
5.2.1 Unloaded Performances .....	146
5.2.2 Loaded Performances .....	148
5.2.3 Problems .....	149
6. Study using the Booster .....	154
6.1 Study on Nuclear Physics using the Booster .....	154
6.1.1 Recoil Mass Separator .....	155
6.1.2 Multiple Gamma Ray Detector .....	156
6.2 Study on Solid State Physics using the Booster .....	160
6.2.1 Interaction between High Energy Heavy Ions and Lattice Atoms .....	160
6.2.2 Radiation Damage due to Electron Excitation .....	160
6.2.3 Study of Lattice Defects using Excited Nuclei .....	160
7. Remarks .....	163

## 1. はじめに

1988年（昭和63年）より建設を開始したタンデムブースターは、6年余の歳月をかけ1994年（平成6年）7月完成した。試験調整運転も順調に進み同年9月に設計とおりの性能を達成した。これにより、タンデム加速器からのビームエネルギーは最高で4倍増が可能となった。

原研タンデム加速器は、単独の加速器とみれば世界第一級の性能である。しかし、1980年代中期を境に世界の趨勢はタンデム加速器の後段にブースターを付置し、エネルギーを増加させる方向へと進み、米国アルゴンヌ研究所を始めとして原研タンデム加速器の性能を上回る加速器が出現した。建設中あるいは計画中のものを含めるとその数は10余になる。このような背景には低エネルギーでの重イオン科学の急速な発展と、それらを支える加速器技術が進歩したことが挙げられる。この時期はまた、高周波加速空洞の超電導化が成功し始めたころでもあった。

このような情勢にあって、原研でもタンデム加速器に後段ブースターとして超電導リニアックを開発し建設することが決まった。本報告書はブースター開発と建設に関する技術資料をまとめたものである。また、最終章にはブースターで主力的に行う研究計画を記載した。

### 1. 1 タンデム加速器建設からブースター開発へ

原研における原子力開発研究に新しい発展を見出すために、重イオン科学を推進する目的で、1982年（昭和57年）世界最高クラスの性能を持つタンデム加速器が設置された。タンデム加速器は広範囲にわたる元素の加速、エネルギーの単色性、安定性に優れ、原研に於ける核物理、核化学、固体物理、材料科学等の研究分野で直ちに利用が開始された。また、数MeVより高いエネルギー範囲の中性子発生も可能となり、核融合炉などの開発に有効な手段を提供した。特に、多種類の加速元素と安定した性能は国内では貴重な存在となり、現在では運転時間の75%程度が協力研究を通し外部の研究に寄与するなど、わが国の原子力研究や関連の基礎研究を支える重要な役割を果たすまでになってきた。しかし、タンデム加速器は静電型加速器であり、その原理上リニアックやサイクロトロンなどの高周波型加速器に比べ加速エネルギー限界が低く、タンデム加速器での重イオンのエネルギー性能では、加速イオンの質量数が約70を越えるとエネルギーが不足し、重い原子核間の核反応が起こらなくなるなど重イオン核物理の研究にとって支障がある。欧米諸国の同種重イオン加速器を所有する研究機関では、いち早くこの問題に取り組み後段ブースターの設置などで大幅な性能向上を図り、原研タンデム加速器の性能を越える加速器が続々と出現した。重イオン科学の研究において、世界の研究レベルに遅れないためには、原研タンデム加速器にも後段ブースターを設置し性能向上をはかることが急務であるとの認識が高まった。当時、米国アルゴンヌ国立研究所の K. W. Shepard らにより開発された超電導の高周波空洞を用いたリニアック型の加速器[1]の開発が成功し注目された。そこで、

われわれは1982年から研究員を同研究所に派遣し高周波超電導技術を研修させ[2]、1984年には原研で超電導のブースターの開発に着手した。

原子力分野における加速器の利用は将来確実にひろがるものと予想される。特に、放射性廃棄物消滅処理や強力中性子源が加速器の工学的利用として具体的に実行に移されつつある。これらの大型加速器を支える技術は高度なものが要求され、すぐに得られるものではない。常に最先端の基礎技術を開発し能力を高めてゆくことが必要である。高周波超電導技術を用いたブースターはまさにこの目的に適合したものである。本開発の目的はタンデム加速器の性能向上と共に、最先端技術による加速器の開発能力を蓄積し、将来の大型加速器建設の技術基盤を築くことにあったが、その目標は充分達成された。超電導空洞とクライオスタットの製作は工作課の協力を得て三菱電機で製作し、ヘリウム冷却系は日本酸素で施工したが、特殊部品の製作や全ての組立調整試験はメーカーの手を借りず、加速器管理室員と先端基礎研究センターの重イオン未知重核研究グループ員の共同作業で行った。これは超電導加速器技術そのものが未だ一般化されておらず、常に研究開発的要素が必要とされたためである。

## 1. 2 研究の発展

タンデムブースターで計画している研究は原子核物理、原子分子物理、固体物理および固体の照射損傷である。これらの研究はすでにタンデム加速器により行ってきたが、ブースター完成によって、大幅な発展が期待できる。特にタンデム加速器の特長である良質のイオンビームの性状を損なうことなく、高エネルギー重イオンが得られることは、これらの研究発展に不可欠である。

原子核物理の研究においては、入射する重イオンの核子当たりのエネルギーが10MeVを境として反応の様子に本質的な変化が理論的に予想され、実験データもそれを示唆するものが出てきている。タンデム加速器の性能では極く軽い元素以外は核子当たりのエネルギー10MeV以上は不可能である。核子当たり10MeV以下のエネルギーでは融合反応、深部非弾性散乱が支配的となるが10MeVを越えると、原子核の多重崩壊あるいは原子核の中を衝撃波が走ることにより種々な現象が起こると予想される。Fig. 1.1 は核反応が可能となる領域をタンデム加速器単体とブースターを付置した場合を示す。この図からタンデム加速器単体の場合は質量数が70を越えると核反応は起こらないが、ブースターによってその範囲が大幅に広がるのがわかる。核反応の範囲が重い原子核同士まで可能になった結果、未知原子核の合成とその核構造の研究が可能となる。特に、この分野の研究をいち早く行うため、反跳生成核分離装置の製作もブースター建設と並行して進めた。

原子分子物理では、タンデム加速器で発生した多価イオンビームをブースターで加減速できることを利用した新しい研究が可能となる。

固体物理や照射損傷の研究では、高温超電導物質におよぼす円柱状格子欠陥の磁束ピン止め効果の研究や固体中の照射損傷の生成及び回復過程の研究、さらに、放射性不安定元素をプローブとした損傷の動的過程の研究が可能となる。

### 1. 3 開発予算および建設日程

加速空洞の開発は1984年（昭和59年）に着手した。翌年、1/4波長型超電導空洞の試作を行い、1986年（昭和61年）にヘリウム温度における高周波特性の測定を行い良好な結果を得た[3]。昭和61年から62年にかけてバンチャーおよびプロトタイプ加速ユニット（デバンチャーとして使用）を発注し、4個の同型超電導空洞を製作した。それらの高周波特性は世界最高水準に達し、6 MV/mという高い加速電界を安定に発生することができた[4,5]。さらに、タンデム加速器のビームを用いたテストにより加速性能の確認をした。以上の基盤開発で技術的に確固たる見通しが得られた。建設はTable 1.1 に示すスケジュールと予算で開始した。ブースター本体（超電導リニアック）は、開発的要素が多いことと40台という多数の超電導空洞を製作するのに時間がかかるため、その前段部（4加速ユニット）と後段部（6加速ユニット）を時期的に分けて製作した。

#### 参考文献

- [1] K. W. Shepard, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26(1979)3659
- [2] K. W. Shepard, S. Takeuchi and G. P. Zinkann, IEEE Trans. Magn. MAG-21(1985)146
- [3] S. Takeuchi, Proc. of the Third Workshop on RF Superconductivity, Argonne (1987) p429
- [4] S. Takeuchi, T. Ishii and H. Ikezoe, Nucl. Instr. and Methods A281(1989)426
- [5] S. Takeuchi, T. Ishii, H. Ikezoe and Y. Tomita, Nucl. Instr. and Methods A287 (1990)257

Table 1.1 ブースター開発年次と予算 (単位百万円)

項目	年度	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	合計
		S61	62	63	H1	2	3	4	5	6	7	
超電導空洞開発および超電導リニャー製作		50	40									90
超電導リニャー前段部				129	301							430
超電導リニャー後段部					129	194	341					664
ヘリウム冷却設備						66	298	298				662
反跳型生成核分離装置								49		49	396	494
建家増改築						68	305	305				678
												総計 3,018

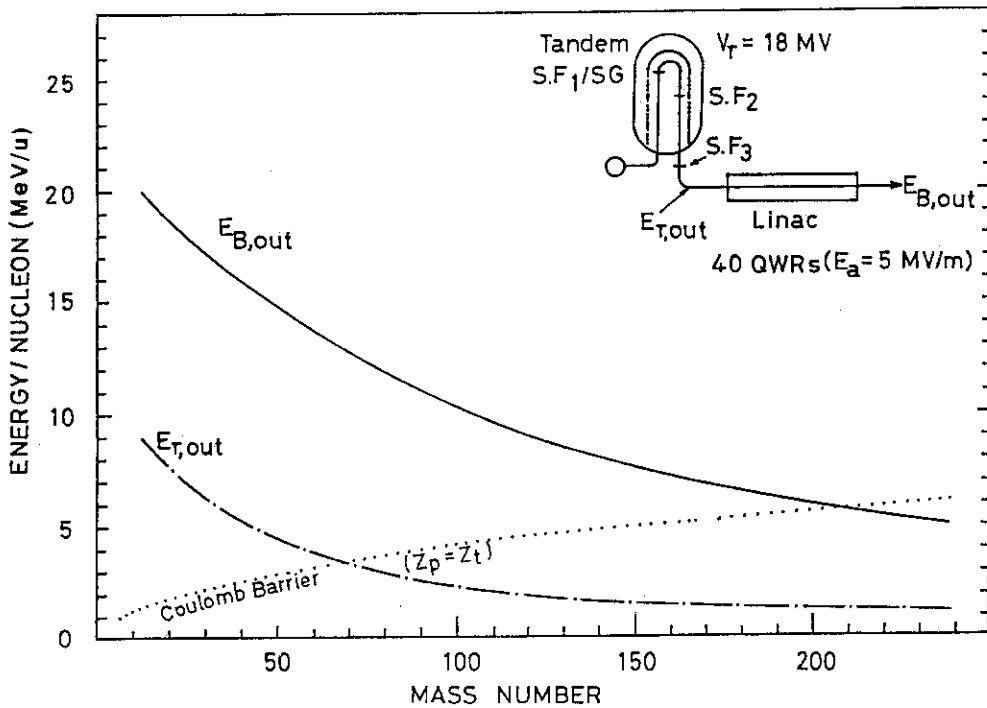


Fig. 1.1 原研タンデム加速器およびブースターのエネルギー性能 ( $E_{T,out}$ ,  $E_{B,out}$ ) 点線は同じ原子核間のクーロン障壁を示す。

## 2. タンデムブースター

### 2. 1 加速器本体

#### 2. 1. 1 概要

タンデムブースターは加速部に1/4波長型ニオブウム製超電導空洞を40空洞用いた位相独立可変型リニアックである。空洞への高周波電力の入力と制御はそれぞれ独立に行われ、各空洞の高周波位相はビームが空洞を通過するタイミングに合わせてそれぞれ独立に設定する構造のものである。加速空洞は全て同じ形状を持ち、入射ビーム速度が光速の5%以上であれば加速が可能で、10%に対し最大の加速効率をもつ(最適ビーム速度)。設計性能は最適速度に対し加速電界が5MV/m以上、加速電圧が0.75MV以上、合計加速電圧が30MVである。

ブースター本体の構成概念図をFig. 2. 1. 1 に、また主要機器配置図をFig. 2. 1. 2 に示す。リニアックの約10m上流にはバンチャーが置かれており、タンデムからの直流ビームを加速周波数と同じ130MHz(正確には129.8MHz)で幅0.3ns以下にバンチ(圧縮)する。バンチャーには加速部と同じ超電導空洞と2倍の周波数(260MHz)の超電導空洞が2空洞ずつ使用されている。タンデムからの直流ビームは約60%がバンチされ、リニアックで130MHzのCW(連続波)で加速される。リニアックの下流約10mにはデバンチャーが置かれており、自由空間ドリフトによってバンチ幅を1 - 1.3 nsに伸し(デバンチ)してからパルスビームに高周波電界をかけ、エネルギー分布の広がり打ち消し、ビームエネルギーの幅を最小化する。デバンチャーには加速部と同じ超電導空洞が2空洞使用されている。デバンチの直後には2重収束の分析電磁石があり正しく加速されたビームだけをターゲット室に導く。得られるビームはエネルギーの揃った連続波ビームである。

加速エネルギーは次式によって与えられる。

$$E = E_{\text{tandem}} + q \sum_j V_{a,j} f(\beta_b) \cos(\Phi_j)$$

ただし、

$E_{\text{tandem}}$ : タンデムからのビームのエネルギー

$q$ : ビームの電荷

$V_{a,j}$ : 空洞の加速電圧  $V_{a,j} = E_{a,j} L$

$E_{a,j}$ : 空洞の加速電界

$L$ : 空洞の加速長

$f(\beta_b)$ : ビーム速度 $\beta_b$ に対するTransit Time Factor(通過時間因子)

$\Phi_j$ : 入射ビームに対する空洞高周波の位相差である。

タンデムブースターのエネルギー性能をFig. 2.1.3 に示す。最高性能においてはターゲットと同じ元素を加速した場合、質量数が 200 くらいまでの元素でクーロン障壁を越えるエネルギーまで加速できる。一方、加速できる最も軽いイオンは放射線しゃへの考慮から炭素イオンまでとした。

## 2. 1. 2 構成

ブースターの構成はFig. 2.1.1 に示すようにバンチャー、リニアック、デバンチャーからなっており、それぞれはRF制御系、冷却系に接続されている。

バンチャーは 130MHzの主バンチャーと 260MHzのサブ・バンチャーの 2つのユニットからなりそれぞれ 2個の超電導空洞をもつ。

リニアック部は10基の加速ユニットに分かれ、Fig. 2.1.4 に示すようにそれぞれのユニットには 4個の 130MHzの超電導空洞が内蔵されている。各ユニットの間には収束レンズとして2連4重極電磁石が置かれている。

デバンチャーには 130MHzの超電導空洞が 2個内蔵されている。

ビーム診断系としては、バンチャーを調整するためにビームバンチの時間スペクトルを測定する検出器がリニアックの入口に、加速空洞の位相を調整するためのビームバンチ位相検出空洞が第3、第6、第10加速ユニットの後に、そして、加速したビームのエネルギーを測定する検出器がリニアックの出口に設置されている。

## 2. 1. 3 超電導加速空洞

### (1) 設計

空洞の形状は、概念図Fig. 2.1.5 に示すごとく、基本的には共鳴周波数の1/4波長の同軸線の一端開放他端短絡型の空洞共鳴器である。導体としては、超電導を利用してわずかな高周波電力で高い加速電界を連続的に発生させるように、優れた超電導体であるニオブウムを使用している。中心導体部分は中空になっており直接液体ヘリウムで冷却される。胴体部分は、ニオブウムと銅のクラッド板を使用しており、銅の高い熱伝導を利用して間接的に液体ヘリウム温度近くまで冷却される。

空洞の共鳴周波数は 129.8MHzで最適ビーム速度( $v/c$ )は 0.1である。諸元表をTable 2.1.1 に、Transit Time Factor (通過時間因子)を Fig. 2.1.6 に、ビーム軸上の加速電界強度を Fig. 2.1.7 に示す。

設計のポイントとしては、①中心導体の支柱にテーパを付け短絡端における最大表面磁界の最小化と音響等の振動による周波数振動の軽減化をはかった、②胴体に長円形の筒を採用することによって、加速電界の軸対称性の確保、ビームポート部の冷却、チューナーの取り付け、マルチパクトリング(電子の空洞壁への多重衝撃)の軽減等の問題を解決した。

設計目標性能は、空洞内に 4W の高周波電力が入力し空洞壁面で高周波損失として消費されたときの加速電界が 5MV/m 以上とした。

Table 2.1.1 130MHz 超電導加速空洞の諸元

共鳴周波数	$f_0$	129.8 MHz
形式		同軸1/4波長型(TME0)
最適ビーム速度	$\beta_{opt}$	$0.10 \times c$ (光速)
高周波蓄積エネルギー	$U_0 / E_s^2$	0.048 Joule/(MV/m) <sup>2</sup>
最大表面電界	$E_p/E_s$	4.6
最大表面磁界	$H_p/E_s$	7.5 mT/(MV/m)
形状因子	$G=QR_s$	26 $\Omega$ (Rs:表面抵抗)
加速長	L	0.150 m
加速ギャップ	$l_g \times 2$	0.040 m $\times$ 2
ドリフトチューブ長	$l_D$	0.070 m

## (2) 製作

詳細な空洞の断面図をFig. 2.1.8 に、製作過程の概要をFig. 2.1.9 に示す。また、詳細な製作手順をFig. 2.1.10 に示す。

始めに材料について述べる。使用したニオブウムの成分の仕様をTable 2.1.2 に、ニオブウムのミルシートの平均的な1例をTable 2.1.3 に示す。胴部に使用するニオブウム-銅のクラッド(複合)板は爆発圧着によって製造したものを使用した。胴部は表面を流れる電流密度が中心導体と比べて1桁小さいので、ニオブウムに対する仕様はやや寛容になっている。

超電導空洞の導体としては、熱伝導が高いほど空洞表面の冷却効果が大きく高い電界を発生できることから、できるだけガス成分の低く熱伝導の高い材料が適している。そのため、熱伝導の指標となるRRR値を強度的に許容し得るかぎりできるだけ高い値にしたほうがよい[1]。ただし、 $RRR = (\text{室温における電気比抵抗}) / (\text{極低温における常伝導状態の電気比抵抗})$  である。通常のニオブウム材(たとえば原子炉仕様)のRRR値は約30である。製作仕様ではニオブウムのRRR値は80以上と指定したが、使用したニオブウムの実測値は一部の空洞(バンチャー、デバンチャー、第1、第2加速ユニットの空洞)は約90で、それら以外は120 - 200である。

つぎに製作技術について述べる。ニオブウム-ニオブウム間の溶接、銅-銅間の溶接はすべて電子ビーム溶接で行った。

表面処理は機械的な研磨の後電解研磨を行った。電界研磨の方法は、濃硫酸 85%、濃度 40% の沸化水素酸 15% の研磨液を用い 28°C において、アルミニウムの陰極との間に 20V の電圧をかけ約 50mA/cm<sup>2</sup> の電流密度で 1分通電- 4分休止のサイクルを繰り返すことによって表面を研磨する方法である。Fig. 2.1.11 に中心導体の研磨装置の構成を示す。胴部の研磨は胴自身の中に研磨液と陰極を入れて研磨した(勿論、底板とカラーを取り付けて)。



中心導体部分については溶接後と電解研磨後に真空熱処理 ( $1 \times 10^{-4}$  Pa以下で 950- 1000°C、6h) を行った。これは内部応力除去と脱ガスを目的としている。胴体についてはバイメタルであるため溶接後一切高温の熱処理はできない。

中心導体部分と胴体はそれぞれが完成してから電子ビーム溶接で合体させている。この部分の溶接は、空洞の内側から電子ビームを照射することが難しいので、外側から照射し内側の角に約0.5mmの幅の裏波を出すようにした。

Table 2.1.2 ニオブウム材の化学成分仕様 (中心導体部用、単位ppm)

Al $\leq$ 20	Co $\leq$ 20	Hf $\leq$ 100	Ni $\leq$ 20	Ta $\leq$ 1000
B $\leq$ 2	Cr $\leq$ 20	Mg $\leq$ 20	O $\leq$ 100	Ti $\leq$ 100
C $\leq$ 30	Cu $\leq$ 40	Mn $\leq$ 20	Pb $\leq$ 20	V $\leq$ 20
Ca $\leq$ 20	Fe $\leq$ 50	Mo $\leq$ 50	Si $\leq$ 50	W $\leq$ 300
Cd $\leq$ 5	H $\leq$ 10	N $\leq$ 50	Sn $\leq$ 20	Zr $\leq$ 200
Nb $\geq$ 99.8%				

Table 2.1.3 ニオブウム材試験成績 (中心支柱用、単位ppm)

Al $\leq$ 20	Co $\leq$ 20	Hf $\leq$ 100	Ni $\leq$ 20	Ta = 900
B $\leq$ 2	Cr = 10	Mg $\leq$ 20	O = 40	Ti = 20
C = 25	Cu = 10	Mn $\leq$ 20	Pb $\leq$ 20	V $\leq$ 20
Ca $\leq$ 20	Fe = 20	Mo $\leq$ 50	Si = 20	W $\leq$ 100
Cd $\leq$ 5	H $\leq$ 10	N = 40	Sn = 10	Zr $\leq$ 100

### (3) 周波数粗調整

周波数の調整を中心導体の製作過程と完成時に行った。前者はドリフトチューブ、中心支柱、胴部の加工、溶接が終了した時点で仮組み立てし周波数を測定しながら中心支柱のドリフトチューブ側の端を切り詰めて調整した。調整周波数は  $129.3 \pm 0.1$  MHz である。完成時の周波数調整は胴を特製の万力で押つぶし塑性変形させることによって、 $129.56 \pm 0.02$  MHz に調整した。窒素ガス中室温の状態から真空中液体ヘリウム温度までの周波数変化は  $+265 \pm 5$  kHz である。

(4) の最終表面処理を終えて空洞をクライオスタットに取り付けるとき最後の周波数調整を行う。10kHz以上の調整は胴の塑性変形により行い、それ以下は下蓋取り付け用の着脱可能なフランジの固定ネジで行う。ほとんどの空洞は  $129.543 \pm 0.002$  MHz に調整した。この値は周波数同調器の可変幅を考慮している。可変幅を大きくとるためには、その分だけ高く周波数を設定する必要がある。

#### (4) 最終表面処理

空洞は原研に納入後研究室においてニオブウム表面の最終表面処理を施した。この表面処理は以下の点で高い超電導性を確保するうえで極めて重要である。マイルスナー効果によって磁場の侵入度 (penetration depth) が約36nm[2]と極めて浅いため、超電導電流にとって円滑で連続性の良い表面が必要である。不純物や異物が表面に埋っているとそこが超電導状態にならないばかりでなく周囲の超電導状態をクエンチするため、不純物や異物のない表面を実現する必要がある。汚れや埃が表面にあると電子分布がみだれ高周波超電導電流に対する表面抵抗が増加する[3]、また、高い電界で電子の放出 (field emission) が起こり高周波損失が過大となり高い最高電界は得られない。そのため、不純物、汚れ、埃等のない円滑で極めて清浄な表面に仕上げなくてはならない。ただし、表面処理の過程でニオブウム表面は水素に曝されるけれどもできるだけ水素を吸収させないように注意しなければならない。銅を含む空洞は真空熱処理による脱ガスができない。水素吸蔵を起こした空洞はQ値が低いこと、特にゆっくり冷却した場合顕著なQ値の低下が起こるからである。

最終表面処理は以下の行程で行った。

- ①電界研磨 (0.5分通電1.5分休止を15サイクル、17-20V、200-300A、30℃)
- ②洗浄 (洗浄液に純水と沸化水素酸を用い柔らかいガーゼを使って表面に残ったイオウ化物の灰汁を拭きとる→純水で流す。)
- ③10%過酸化水素を空洞のなかに入れ40℃で30分-60分超音波洗浄をする。
- ④18MΩ・cmの超純水を循環させながら40℃で30分-60分超音波洗浄をする。
- ⑤クリーンルームに空洞を移し空洞の外側にヒーターを取り付け温めながら18MΩ・cmの超純水をスプレーして洗浄する。噴霧器の原理を使って5-7kg/cm<sup>2</sup>の窒素ガスで水の噴射圧を高めている。
- ⑥メタノールをスプレーして水を流してから乾燥させる。
- ⑦下蓋を取り付ける。穴に蓋をし清浄な乾燥窒素ガスを空洞内に入れておく。

#### (5) 周波数同調器、高周波入力結合器、ピックアップ端子

運転中の周波数同調については、胴部を機械的に圧縮して周波数を下げるチューナーを採用した。Fig. 2.1.12 に概念図を示す。周波数の最大下降幅は40kHzである。その時の空洞の変形は0.6mmである。最大の変形に要する力は約1tであり、その構造はテコの原理を2段階利用し約1/10の力で圧縮できる万力の形式である。締め付けのネジ (ピッチ1mm) の頭には減速比1/60のウォームギアを付けてある。ウォーム1回転あたりの周波数変化は10-30Hz/回転である。ウォームギア等の摺動面にはかじりつき防止の表面処理 (MoS<sub>2</sub>の真空焼き付け処理) を施してある。

高周波入力結合器はFig. 2.1.13 に示す結合度可変式の静電容量型結合器である。結合度が最大のときのバンド幅は100Hzで、Fig. 2.1.14 のように可変である。運転時は20-40Hzのバンド幅で使用する。最小の結合度は1以下で、Q値の測定が可能である。取り付け位置は空洞の底面にあり、厚さ0.05mm、長さ25mm、直径36mmのステンレス板の筒で熱絶縁されている。入力プローブを上下に摺動させるため、摺動面はかじりつき防止のため鉛めっきを施し、高周波同軸

線は真空内で高電圧に耐え十分柔軟な構造にした。その上、同軸線の重みに対するカウンターバランスをとりつけた。こうした機械的可動部分の対策はクライオスタットの開放と修理を防ぐ意味で重要である。上下駆動にはラック&ピニオンと平歯車を使用し、11回転で40mm動く。上限の位置にリミットスイッチを有し、起動時リセットするために用いられる。加速電界を検出するピックアップ端子は空洞の底板に取り付けた。入力結合器と接近しているが結合器との結合度は十分小さい。感度は1MV/mに対し50Ω整合端でpeak-to-peakが1Vとした。

#### (6) 性能 (オフライン・テスト結果)

空洞は表面処理後いくつかの空洞を除きクライオスタットに組み込む前にテスト用のクライオスタットを使って空洞の性能を測定している。Fig. 2.1.15 に典型的な Q-E 曲線 (高周波入力を変えながら結合係数を 1 にして加速電界と Q 値を測定した結果) を示す。

ところで、空洞は冷却直後は multipactoring (電子の空洞壁への多重衝撃) が極めて低い電界 (0.2MV/m 以下) で起こり、これが障壁となって高い電界 (磁場) を直ぐに発生することは出来ない。この障壁は高周波入力の結合度を最大にして 100W 程度のアンプ出力で (電力の大部分は反射され空洞に入る電力は少ない) コンディショニングすれば 15 分程度で乗り越えられるようになる。完全に引っかからなくなるまでには 30 分-60 分かかる。他の型の空洞と比べると短時間で退治できる方である。Fig. 2.1.15 の Q-E 曲線はこうした処理後測定したものである。Fig. 2.1.16a に空洞への高周波電力が 4W 入力したときの (つまり、高周波損失が 4W の時の) 加速電界 ( $E_a(4W)$ ) の結果を、Fig. 2.1.16b に出来るだけ電力をつぎ込み到達できる最大の加速電界 ( $E_{a,max}$ ) の結果を示す。

Fig. 2.1.15 の Q 値は右下がりとなっているがこれは温度上昇による表面抵抗の増加によるものである。もし空洞表面が汚れていたら 4MV/m 付近から上で電子の電界放出 (electron field emission) が起こり Q 値は急激に下降する。このような場合は 1kW 程度の高周波パルスを用いて瞬時的に (5ms-100ms) 高い電界を発生させ放電により埃等の汚れを取り除くコンディショニングをすれば Q 値の急激な下降を改善することが出来る。汚れが酷く改善が十分でない場合は  $1 \times 10^{-3}$  Pa のヘリウムガスを空洞内に入れコンディショニングをすればより良い改善が得られる [4,5]。しかし、上記の結果はほとんどこのようなコンディショニングをせずに得られたもので、空洞内は十分清浄であると言える。

以上の結果は空洞を液体窒素と液体ヘリウムを使って出来るだけ急速に予冷して得られたものであるが、ゆっくり予冷すると Q 値が低下する現象が発見されている [6]。ひとつの空洞 (L-3) を用いて詳しく試験した結果、この Q 値低下は 120-100K で顕著に起こることがわかった [7]。130-90K の温度区間での保持時間を変え Q 値を測定した結果を Fig. 2.1.17 に示す。この問題は高周波超電導の研究者の間で追求され次のように解釈されている；化学的な研磨の過程で水素を吸蔵したニオブニウムは 100K くらいの温度で水素が過飽和になりニオブニウムとの水素化物となって表面に析出する。水素化物は弱い超電導体でわずかな磁場で常伝導状態に転移するため高周波損失が大きくなる。彼らはこれを「Q-disease」と呼んでいる [8]。冷凍機で冷却する (オンライン) 場合は上記の温度区間を通過するのに 4 時間程度かかるので水素で汚染された

空洞はQ値低下と加速電界低下が問題となる。

超電導空洞はQ値が  $10^9$  と高く固有のバンド幅が狭い。周波数変動が大きいと位相制御のため高周波入力結合度を強くして発振回路のバンド幅を大きく広げなくてはならない。そのため、外部からの振動、液体ヘリウムの圧力変動による周波数振動をできるだけ小さく抑える必要がある。外部からの振動に対するテストでは 1Hz を超えるようなことはなくまったく問題なかった。しかし、液体ヘリウムの圧力変動に対しては  $1.25\text{kHz/kg/cm}^2$  の周波数変化が認められた。これは主に上部底板（中心導体と胴体間の厚さ 9.5mm の短絡板）の変形の結果ドリフトチューブの上下動によって起こる。上部底板の中央（の穴の部分）を上フランジに対して固定する金具を取り付けた結果、周波数変化率は  $270\text{Hz/kg/cm}^2$  に減少した。この変動は主にドリフトチューブの圧力変形に因るものでこれを消去するのは難しい。したがって、例えば液体ヘリウムの圧力変動が  $0.05\text{kg/cm}^2$  ある場合 13.5Hz の周波数変化が起こるのでバンド幅を 27Hz 程度に広げる必要がある。

## 2. 1. 4 ビーム光学

### (1) 計算方法

ビーム光学の計算により、ブースターのバンチング系と空洞等の配置を検討した。特に、タンデムの前段でビームをバンチ（パルス化）しないでブースターの前段にダブルドリフト・ハーモニック・バンチャーを置くことによって、どの程度のビームが有効に加速されるかを検討した。また、質量数の小さいビームから大きいビームまでなるべく通過率が高くなるような機器の配置を検討した。

ビーム光学の計算は、主に Tomita[9] の開発した計算コード「BOOSTER」を用いてビームをトレースした。このコードでは、4重極レンズを通過するときの軌跡は輸送行列を用いて計算する。また空洞の中の軌跡は粒子の運動方程式を計算することにより求められる。ただし、ビームが空洞内を通過する際にビームの速度が変化しないという近似(TTF-1)および空洞の前半と後半で別々の速度で扱う近似(TTF-2)でも計算することができる。Tomita[9]によればTTF-2の近似で計算すれば必要な精度が得られることが確認されており、実際の計算ではこの近似を用いている。また、この近似で計算したときに空洞内でのビームの発散は、動径方向の電場  $E_r$  極値(4点ある)で  $\delta$  関数的に速度変化を受けるとして計算している。空洞内の電場  $\mathbf{E}(z, r)$  は、電場がビーム軸に対象であるとして  $E_z(z, 0)$  の周りで展開する。 $E_z(z, 0)$  は空洞で実測した値を用いている。

バンチャーの電圧の設定は、バンチする時間（位相）範囲とバンチされる位置を指定し、その位置でバンチの時間巾が最小になるように設定する。通常  $-105^\circ \sim +105^\circ$  の範囲のビームをリニアック入り口でバンチされるように設定する。リニアックの位相はリニアックの出口でビームがバンチされるようにする。このようにすると、デバンチャーでエネルギーを揃えたときに、エネルギーの広がり最小になる。バンチャーとリニアックの間にある3連4重極レンズは指定した位置にビームが収束させるようにできる。通常はリニアックの入り口付近に収

束させる。クライオスタット間の2連4重極レンズは加速空洞で受けた発散成分を打ち消す強さで設定する。この強さは係数を掛けて指定できるようになっているが、通常は1.0の係数で計算すればビーム輸送上で問題はない。リニアックとデバンチャーの間にある3連4重極レンズはデバンチャーの中心でビームが収束するように決められる。デバンチャーの電圧は、デバンチャーの位置でのビームの速度分布と位相分布の相関図( $\Delta v - \Delta \phi$ )より、電圧を入力することにより行なう。

## (2) 計算結果

リニアックをタンデム加速器の後段加速器として用いる場合は、通常はタンデム加速器に入射する前にプリバンチャーとスイーパーを置き、ある程度バンチされたビームのみがバンチャーに入射するようにする。そこで、まずプリバンチャーの有効性を検討した。プリバンチャーはストリッパフォイルの位置で時間が収束するように電圧をかける。原研タンデム加速器は折返し型のために、時間収束後にビームが180度偏向電磁石(BM-TL-1)を通過する。この通過時間が長いためにバンチ巾が広がる。さらに、加速後の90度分析電磁石(BM-04-1)を通過する際の行路差などにより、バンチャーに入射する時には一旦バンチされたビームの時間巾は広がっている。バンチャーに到達したときの位相の広がりや速度の遅いビームほど大きく、計算によればClビームで $\pm 30^\circ$ 、Niビームで $\pm 60^\circ$ 、Iビームで $\pm 160^\circ$ となる。このように、Niビーム程度までの質量数のビームに対してはプリバンチャーは有効であるが、Iのような質量数の大きなビームを加速する時にはプリバンチャーの効果はない。本ブースターのバンチャーは130 MHz( $\omega$ )と二倍の周波数( $2\omega$ )のサブバンチャーより構成され、なるべく鋸波に近い形になるようにしている。Tomita[9]の計算によれば、 $\omega$ バンチャーと $2\omega$ バンチャーを適当に離すことにより $3\omega$ のバンチャーを実効的に付け加えたのと同じ効果が得られる。 $2\omega$ バンチャーを $\omega$ バンチャーの上流に設置したときには、 $d/L \sim 0.3$ 、 $V(2\omega)/V(\omega) \sim 0.2$ のときにビームが最もよくバンチされ、入射したビームの約60%が加速される。ここで $d$ は $\omega$ バンチャーと $2\omega$ バンチャーの距離、 $L$ は $\omega$ バンチャーからリニアックまでの距離である。この距離と電圧の関係は、入射するビームの種類やエネルギーに依存しない。 $\omega$ バンチャーを $2\omega$ バンチャーの上流に置いたときも同様なことが導かれる。ただし、この時の最適条件は $d/L \sim 0.1$ 、 $V(2\omega)/V(\omega) \sim 0.3$ である。ブースターでは、この配置を採用している。

$^{12}\text{C}$ 、 $^{35}\text{Cl}$ 、 $^{127}\text{I}$ ビームに対して計算を行った。Fig. 2.1.18-20は $^{127}\text{I}$ をブースターに入射した時の計算結果である。入射するビームの条件は、 $E = 271\text{MeV}$ 、 $q = 20$ 、エミッタンスは $\Delta x, \Delta y = 1.31, 1.47\text{ mm}$ 、 $\Delta p_x, \Delta p_y = 0.91, 1.51\text{ mrad}$ 、 $\Delta E = 250\text{ keV}$ である。また加速空洞の電圧は $E_s = 5\text{ MV/m}$ 、位相は $-20$ をとっている。Fig. 2.1.18はシンクロナスビームがブースターを通過するときの空間的広がりを示したものである。Fig. 2.1.19はビームの位相の様子を示したもので、入射時に $-120^\circ$ から $+120^\circ$ の範囲にあるビームは、シンクロナスビームの周りを回転でき、加速される。この図は、見やすくするために $-10^\circ$ から $10^\circ$ の範囲を拡大してある。Fig. 2.1.20のヒストグラムには、上記のビームのエミッタンスの条件でランダムにビームを3,600個発生させ、ブースター加速後のイメージ点でのビームの空間的大きさや速度の広がり、また、初期位相に対する通過率が表されている。計算によれば、 $^{12}\text{C}$ で約55%、

$^{35}\text{Cl}$ で約60%、 $^{127}\text{I}$ で約70%のビームが空間的にもエネルギー的にも揃って加速される。

さらに、Fig. 2.1.20 の下段には各空洞の前に置かれたバッフルにビームがあたる様子も表されている。ここでバッフルの半径は8mmとしている。この図から、バンチされなかったビームはリニアックを通過していくうちに空間的にも広がりバッフルで止められることが分かる。Fig. 2.1.21 には $^{12}\text{C}$ を加速したときの計算結果を示した。この場合は、バンチされなかったビームもほとんどリニアックを通り抜けることが分かる。実際にはバッフルを各クライオスタットの入射口と下流側の2台の空洞(4n+3, 4n+4番目)の入射口に取付けることにし、空洞にビームが当たらないことを計算で確認した。

## 2. 1. 5) バンチャー

ブースターに採用したバンチャーのシステムは、ダブルドリフト・ハーモニックバンチャーと呼ばれるもので、130MHzの主バンチャーの下流に(上流でも可)少し距離を置いて2倍の周波数の260MHzのデバンチャー(ここではサブバンチャーと呼ぶ)を置き、ドリフト後縦方向にビームを収束し圧縮させるものである。ビーム圧縮率は上述の計算によると約60%である[9]。

### (1) 130MHzバンチャー・ユニット

主バンチャーは130MHzの超電導空洞を2空洞搭載している。性能的には1空洞で十分であるが、不可欠な要素であるので故障に対応しうるように2空洞を入れた。Fig. 2.1.22 にクライオスタットを示す。このユニットは最初に開発したもので、真空容器、熱シールドの構造が他のユニットと異なり、ビームポートの上で真空容器が2分割でき、上部の本体を取り外すことができる(この構造は分解組み立て作業が複雑であったため次から設計変更した)。液体ヘリウムの配管経路等はその後の開発に合わせて改造が加えられている。Fig. 2.1.23a に上蓋ポート配置図を示す。

### (2) 260MHzサブバンチャー・ユニット

サブバンチャーは260MHzの超電導空洞を2空洞搭載している。Fig. 2.1.24 にクライオスタットを示す。構造は主バンチャーと異なり、分解時はビームポートをビームラインから外し別の場所に移動してから、ボルトと冷却配管の継手を外し、上蓋を持ち上げると空洞が露出する構造となっている。熱シールドの下部は真空容器の下部槽の内側に固定されている。ヘリウムデューワーの下のフランジは主バンチャーと同じで同じ高さであり、130MHz空洞と交換(位置反転)することが可能である。そのため、260MHz空洞の上には長さ調整と熱交換のための管が付けられている。Fig. 2.1.23b に上蓋ポート配置図を示す。

### (3) 260MHz超電導空洞

空洞の概念図をFig. 2.1.25 に示す。基本的には130MHz空洞と同じ構造であるが、小型で、それほど高い電界を必要としないため、中心導体はテーパーをつけていない。諸元表をTable

2.1.4 に、ビーム軸上の加速電界強度をFig. 2.1.26 に示す。テストクライオスタットで測定したQ-Ea曲線をFig. 2.1.27 に示す。

Table 2.1.4 260MHz超電導空洞の諸元

共鳴周波数	$f_0$	259.6 MHz
形式 (モード)		同軸1/4波長型(TME0)
最適ビーム速度	$\beta_{opt}$	$0.10 \times c$ (光速)
高周波蓄積エネルギー	$U_0/E_s^2$	0.008 Joule/(MV/m) <sup>2</sup>
最大表面電界	$E_p/E_s$	4.2
最大表面磁界	$H_p/E_s$	11 mT / (MV/m)
形状因子	$G=QR_s$	$20\Omega$ ( $R_s$ :表面抵抗)
加速長	L	0.070 m
加速ギャップ	$l_g \times 2$	$0.020 \text{ m} \times 2$
ドリフトチューブ長	$l_b$	0.030 m

## 2.1.6 加速ユニット

### (1) クライオスタット

加速ユニットの断面図をFig. 2.1.28 に示す。4つの空洞は内容積 $0.06\text{m}^3$ の横型の円筒形液体ヘリウムデュワーにぶら下がるかたちで固定され液体ヘリウムの供給を受ける。デュワーは6本のエポキシ樹脂(GFRP)の断熱支持棒で真空容器の上蓋に固定されている。ただし、中間に熱シールドの上蓋部がある。液体ヘリウムは、LHe入り口ポートから入り、空洞の上フランジについている熱交換器で4つの空洞を予冷してから、デュワーの中に入る。気化したガスまたは出口に達した液はLHe出口ポートへ出て行く。クライオスタット真空容器の内側には空洞への熱副射による熱侵入をしゃへいする熱シールドがあり、それは空洞とは別の冷却経路を流れる60-80Kの低温のヘリウムガスで冷却される。さらに、熱シールドと真空槽の間には(上蓋部を除き)パーマロイ製の間熱シールドがあり、熱シールドへの侵入熱を1/2にするとともに地磁気しゃへいを行っている。80K低温ヘリウムガス系への熱負荷は130W/基である。本体全クライオスタットのLHe系への熱負荷、80K低温ヘリウムガス系への熱負荷をTable 2.1.5 に示す。地磁気しゃへいはパーマロイ製の間熱シールドだけでは不十分であったため、真空容器は純鉄で造り、しゃへいを完全にした。空洞の位置での磁場強度は $3\mu\text{T}$ 程度である。どのクライオスタットも高圧ガスに対する設計、製作、検査がなされている。空洞と液体ヘリウム配管系の設計圧は $1.7\text{kg/cm}^2$ (絶対圧)で、同圧で開く安全弁も装着されている。80Kのヘリウムガス系の設計圧は $16\text{kg/cm}^2$ (絶対耐圧)である。真空排気系には1000 l/sの磁気浮上型ターボ分子ポンプを上蓋上に倒置させて使用している。室温における真空容器壁面の到達真空度は $1 \times 10^{-6}$  Pa、

冷却時の真空度は  $1 \times 10^{-6}$  Pa以下である。

## (2) 空洞および冷却系の制御機器

空洞の制御機器、クライオスタットの付属機器の導入端子等は真空測定子を除きクライオスタット上蓋に取り付けられている。Fig. 2.1.29 に加速ユニットポート配置図を示す。

### a. 周波数同調器駆動部

周波数同調器駆動部は磁気結合型の回転導入端子にステップモーターと200pprのシャフトエンコーダがついている。回転軸はユニバーサルジョイント→外径6mmの中空のステンレス鋼回転軸→伸縮継手（スライディングジョイント）→ユニバーサルジョイント→周波数同調器へと連結されている。

### b. 高周波入力結合器駆動部

高周波入力結合器駆動部は磁気結合型の回転導入端子にステップモーターと500pprのシャフトエンコーダ（使用していない）が付いている。回転軸はユニバーサルジョイント→外径6mmの中空のステンレス鋼回転軸→3連結の偏向角30度のユニバーサルジョイント（全偏向角90度）を経て高周波入力結合器へと連結されている。

### c. 高周波電力供給ケーブル

高周波電力供給ケーブルはパルスコンディショニングを考慮して最高1kWまで真空中で耐えられ、かつ入力結合器が円滑に40mm以上の上下動できるように十分柔軟にした。Fig. 2.1.30 に構造図を示す。発生する熱はできるだけ真空容器、次に熱シールドに流れるように考慮した。

### d. 加速電界ピックアップケーブル

加速電界を検出するピックアップケーブルは2重シールドで長さ1.7mのRG400U(50Ω)の外皮を剥がした同軸線を使用している。

### e. ビームバッフル

発散するビームが空洞のドリフトチューブあるいはビームポートの内面を叩かないように、クライオスタットビーム入り口に直径16mmバッフル（タンタル）と第3、第4空洞ビーム入り口に直径22mmバッフル（アルミニウム）が取り付けられている（2.1.4）項参照）。

### f. 液体ヘリウム液面計

超電導線を利用した液面計を使用している。感応長305mm。

### g. 各種測温素子

すべての加速空洞、デュワー、熱シールドに以下の測温素子を装着している。

空洞測温素子	シリコンダイオード	LAKE SHORE DT-470
液体ヘリウムデュワー測温素子	白金-コバルト抵抗体	CHINO R800-6
熱シールド測温素子	白金-コバルト抵抗体	CHINO R800-7

### h. 熱負荷補償ヒーター

周波数の負荷変動に対し冷凍機への負荷を一定範囲に制御するためのもので、最大発熱量は30W（通電電圧300V、電流100mA）である。



## (3) 4重極レンズ

時間的にバンチする位相でビームが加速空洞を通過する時は、空間的にはビームは発散する方向に力を受ける。そのため、リニアック中をビームを輸送させるためには、ビーム収束用のレンズが必要となる。本ブースターでは各クライオスタット間に2連4重極電磁石を置いた。ビームトレースの計算によれば、空洞を通過する際に受ける発散のパラメーター  $kL$  は 0.4~0.6で、これと同等の収束力を2連4重極レンズで与えれば、ビームの輸送には問題ないことが分かっている。実用的に用いる可能性のあるビームの中で、収束力が最も必要な時はPbを加速する時で、300MeVの $Pb^{22+}$ をブースターに入射したときに4重極レンズに必要なとされる条件は、

$$L^2(dB/dx) (= B\rho(kL)^2) = 0.48 \text{ Tm}$$

である。ここで $L$ は4重極電磁石の磁極長、 $dB/dx$ は磁場勾配である。計算によれば、ビームの位相のアクセプタンスを大きくするためには、各クライオスタット間はなるべく狭くしたほうが良い。また、ビームダクトは内径が20mm程度あれば、ビーム輸送上問題がないことが分かっている。このため4重極電磁石は、上記の条件を満足した上でなるべくコンパクトであることが望ましい。

各クライオスタット間に設置した2連4重極電磁石はすべて同じで、その諸元は、

ボア径	$32 \pm 0.1 \text{ mm}$
磁極長	$140 \pm 0.2 \text{ mm}$ (有効磁極長 $157.8 \text{ mm}$ )
磁場勾配	$25 \text{ T/m}$ (電流値12Aの時)

である。また、4重極電磁石の中心を通るビームダクトの内径は27mmである。

2連の4重極電磁石は同芯軸を合わせて台に固定される。同芯度は0.1mm以下である。二連の4重極電磁石は、前後に $\pm 10\text{mm}$ 、左右に $\pm 20\text{mm}$ 、上下に $\pm 10\text{mm}$ 可動する架台に取り付けられており、ビームコースにアライメントさせることができる。

## 2. 1. 7 デバンチャー

Fig. 2. 1. 31 およびFig. 2. 1. 32 にクライオスタット断面図と上蓋ポート配置図を示す。このユニットはバンチャーの次に早く開発されたもので、真空容器の形状、熱シールドの構造に改良が加えられている。ただし、本体加速ユニットに至るまでにさらに改良が加えられたため加速ユニットとは次の点で異なる。真空容器はステンレス鋼(SUS304)製で、地磁気シールド兼用の中間熱シールドは満足のゆく磁気しゃへい効果が得られず装着してない。液体ヘリウムの冷却経路は空洞の予冷後一度クライオスタットの外を真空2重配管を介してデューワーに入っている。

Table 2.1.5a LHe系への熱負荷

侵入熱	加速ユニット	10基	3.5 W	35 W
	バンチャー等	3基	2 W	6 W
高周波損失		40 空洞	4 W	160 W
		3 空洞	2 W	6 W
合計				207 W

Table 2.1.5b 80K低温ヘリウムガス系（熱シールド）への熱負荷

侵入熱	加速ユニット	10基	130 W（中間熱シールド付）
	バンチャー		120 W（中間熱シールド無し）
	サブバンチャー		70 W（中間熱シールド付）
	デバンチャー		120 W（中間熱シールド無し）
合計			1.610 W

## 2. 1. 8 ビーム（縦方向）診断系

### (1) バンチャー調整用エネルギー・時間スペクトル検出器

調整するパラメータは 130MHz空洞の電界、260MHz空洞の電界と位相の 3つである。リニアック入り口で圧縮されたビームバンチの時間幅を最小にする。

#### a. エネルギー時間スペクトル検出器

Auターゲットからのラザフォード散乱粒子をSi荷電粒子検出器で検出し、エネルギーと時間の2次元スペクトルを収集する回路系からなる。

Auターゲット：膜厚 150-200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  直径 14mm 装着枚数 2枚（手動交換）

Si検出器：散乱角 25度 立体角 0.64 m sr

遠隔操作：ターゲット 入/出、計数率調整スリット

#### b. ビームバンチ共鳴空洞（装着予定）

(2) で述べる加速空洞位相設定用ビームバンチ位相検出器と同様にビームバンチ周波数 (129.8MHz) と同一ないしは整数倍(N)の周波数で共鳴する共鳴空洞を用いパルスビームを通過させると  $S = 2 \sqrt{R r} f(\beta) / N$  の感度で高周波信号を取り出すことができる[10]。ただし、Nは周波数逡倍数 Rはシャント抵抗、rはピックアップのインピーダンスである。高周波信号を

ベクトル電圧計に入力し、イ) 130MHz空洞に対する 260MHz空洞の位相を高周波信号の位相変化が0になる点から、ロ) 130MHz空洞と 260MHz空洞の電界を高周波信号の振幅が最大となる点から求めることができる。ただし、狭いバンチ幅まで測定するには大きなNの共鳴空洞が必要となる。ここでは  $N=2.4$  の共鳴空洞を使用する。

## (2) 加速空洞位相設定用ビームバンチ位相検出空洞

電荷 $q$ 、速度 $v_0$ 、運動エネルギー $E_0$ のイオンビームが加速空洞で加速されると

$$\Delta E = q V f(\beta) \cos \Phi$$

のエネルギー増加を得る。さらに $L$  m 自由空間を飛行したあとの点での通過時間は空洞で加速も減速されない通過時間と比べて、 $\Delta E \leq E_0$  の場合

$$\Delta t = -L / (2v_0 E_0) q V f(\beta) \cos \Phi$$

の時間差が起こる。あるいは、 $\Delta \phi = \omega \Delta t$  の位相差が起こる。同期位相 $\Phi$ は空洞の高周波位相を $\phi$ としたとき  $\Phi = \phi - \phi_0$  とすれば、 $\phi = \phi_0$  は最大の加速時の高周波位相であり、この量をビームバンチ位相検出器を用いて測る。

ビームバンチ位相検出器としてはビーム周波数と同じ共鳴周波数をもつ共鳴空洞が適している。パルスビームが検出空洞を通過するとエネルギーが蓄積されプローブから高周波信号を取り出すことができる。高周波信号の位相差 $\Delta \phi$ はベクトル電圧計を用いて計測する。 $\phi_0$ は、高周波位相 $\phi$ を一周させ $\Delta \phi$ を $\phi$ の関数としてプロットすれば、求められる。特に、 $V=0$ にしてベクトル電圧計の位相の読みをリセットしてから測定すれば  $\phi=0$  の点 ( $\phi = \phi_0 \pm \pi/2$ ) の読みから $\phi_0$ を直ちに求めることができる。 $\phi_0$ が定まれば同期位相 $\Phi$ を直ちに任意の設定値、例えば $\Phi = -18^\circ$ 、に設定することができる。

ブースターに使用しているビームバンチ位相検出空洞は3個あり、 $\beta = 0.08, 0.1$  および  $0.11$  の1/4波長型(銅/ステンレス鋼製)共鳴空洞である。それらは順番に第3ユニット、第6ユニット、第10ユニットの後ろに設置されている。形状をFig. 2.1.33 に示す。検出感度  $S$  は

$$S = 2 \sqrt{R_0 r} f(\beta)$$

で与えられる[10]、ただし $R_0$ は空洞のシャント抵抗、 $r$ は結合度=1の検出プローブのインピーダンス(=50 $\Omega$ )である。Table 2.1.6 に位相検出空洞の性能を示す。検出信号は40dBの増幅器を通して制御室のベクトル電圧計に送られ、基準高周波信号と比較され位相と振幅が測定される。この位相と振幅はビームの安定度、強度のモニターとしても有用である。ビームバンチ位相検出と空洞の同期位相設定の作業は、40回も単調に繰り返すため計測制御用のワークステーションを利用して自動化している。

Table 2.1.6 ビームバンチ位相検出空洞の性能

$\beta_{opt}$	$R_o(M\Omega)$	$S(\mu V/nA)$
0.08	0.26	7.2
0.10	0.66	10.3
0.11	0.88	11.9

### (3) 加速ビームエネルギー検出器

加速空洞調整時および加速後のビームエネルギーを測定する検出器で(1)のバンチャー調整用エネルギー時間スペクトル検出器とまったく同様のものを使用している。ただし、時間スペクトルは計測しない。

### (4) デバンチャーの調整

デバンチャーの調整は、ビームを分析電磁石で90°偏向後BPM(ビームプロファイルモニター)とFC(ファラデーカップ)からのビーム電流を観測しながらビームがビーム軸上に収束するように空洞の位相、電界を調整する。

## 2. 1. 9 RF制御系

### (1) 概要

ブースターには46台の超電導空洞が使用されている。RF制御系は各超電導空洞内に共振周波数129.8MHzの高周波を発生し、その振幅と位相を安定化し制御するもので、6台の制御ユニット(アメリカASI社製)を使用している。制御ユニット1台は8台の超電導空洞と2基のクライオスタット、および2台の4重極電磁石等を制御できる。制御ユニットは制御パラメータ類を表示するビデオ・モニターと制御盤を持ちRF制御室から遠隔操作できる。

実際の運転はRF制御室で行うようにしたが、将来はRS232Cポートから光ファイバーを経由してセンター・コンソールで制御できるようにする。

### (2) 動作原理

Fig. 2.1.34 に空洞制御回路の概念図を示す。基本的には回路は空洞"Q"→制御回路→"RF Power Amp"→空洞の自励発振ループを形成している。

図の点線の左半分は高周波ループを示し、超電導空洞"Q"からの信号はリミッターで一定の振幅にしてから、"PHASE&AMPLITUDE MODULATION"で位相と振幅を右半分の制御回路からの信号に

従って変化させ、"RF POWER AMP" で電力増幅してから空洞に戻され自励発振させる[11]。このループは $10^6 \sim 10^7$ 程度の高いQ値を持ち 129.8MHzの正弦波信号を発振する。

図の点線の右半分は空洞制御回路を描いている。まず、ピックアップで検出された電圧信号は一方は振幅制御、他方は位相制御回路へと分岐される。振幅制御回路では、入力段の"INPUT GAIN"により入力信号のレベルを変えられる。整流し増幅された信号は差動増幅回路で一定電圧(10V)と比較され偏差が出力される。位相をロックしている時にはここで信号が一定(10V)になるように回路が働く。したがって、"INPUT GAIN"が空洞の電界を変えるパラメーターとなる。位相をロックしていない時は、ここはスキップし次の差動回路で"AMPLITUDE REFERENCE"と比較され偏差を出力している。この時は"AMPLITUDE REFERENCE"が空洞の電界を変えるパラメーターとなる。これは丁度、タンデム加速器のGVMモードでターミナル電圧の制御に似ている。

次に位相制御の動作は、スリット・モードのエネルギー・フィードバック制御に似ている。その信号処理の流れは、先ずリミッターで一定の振幅となった信号の一部を基準信号発生器からの"RF REFERENCE" (129.8MHzの正弦波) 信号と照合してベクトル成分X, Yを生成する。"REFERENCE PHASE SHIFTER"では、空洞に発生している高周波の位相をビームに対して同期位相とするための位相の設定値"PHASE REFERENCE"に対し位相角の偏差が出力される。

これらのフィードバックされた振幅比と位相角は極座標成分となっているのでX, Y成分に変換して"LOOP PHASE SHIFTER"へ送られる。ここでは、"LOOP PHASE"を調節することによって自励発振の最適化をする。最後に、"PHASE&AMPLITUDE MODULATION"で高周波信号を変調・合成し制御信号として"RF POWER AMP"へ伝達される。

### (3) 制御ユニットの構成

本ユニットは、Fig. 2. 1. 35 の制御ユニット構成図に示すようにマイクロコンピュータ、RF信号、アナログ信号、デジタル信号、ステッピング・モーター等のインターフェイス、およびEPROM に書かれたソフトウェア等々から構成されている。

Microcomputer ボードは、DEC社のLSI-11を内蔵したファルコン (KXT-11AA) を使用しており、Video Display ボード (VDB)、8枚のResonator Control ボード (RCB) そしてGeneral Purpose ボード (GPB) を Qバス上に接続しこれらのインターフェイスを制御している。

VDB ボードは、空洞制御のパラメーター類を表示するビデオ・モニターの制御を行っており、ビデオ・モニターに白黒ビデオPVM-122Jを使用している。

RCB ボードは、8台の超電導空洞のRF制御とモニターおよび16個のステッピング・モーター制御のために 8枚のボードから成る。

GPB ボードは、2基のクライオスタットのバルブ類、2台の 4重極電磁石、液体窒素と液体ヘリウム・レベルのモニター、真空、およびその他クライオスタットのパラメーター類に関する制御盤上のスイッチ操作と LED表示を扱う。

RFボード (RFB-03) は、超電導空洞からのピックアップ信号を受信しRCBボードへの制御信号を作り、また RCBからの制御信号を受信する。高周波回路のためシールド・ボックスの中に収納されており、方向性結合器、アッテネーター、リミッター、位相変調器等が内蔵されている。RCB ボードと 1対 1に対応して 8個のボックスを持っている。

Reference Limiter & Splitter (RLS-03) は、129.8MHzのRF基準信号を受信して 8枚の RCB ボードへ分配している。過大な入力を制限し一定の信号を得るためのリミッター機能を持っている。

RFマルチプレクサ (RFM-03) は 8系統の超電導空洞の電界強度 (MV/m) 表示用信号をフロント・パネルの 1箇のBNCコネクタへ出力するための複数送信を行う。

ステッピング・モーター駆動用ボードは、超電導空洞のカプラーおよびチューナーのステッピング・モーター 8系統で16個用の駆動回路が 2枚のボードに組込んである。

本ユニットの制御プログラムは、マイクロコンピュータに内蔵した EPROMに書込まれている。このプログラムの内容はユニット全体の初期化、各種パラメータ (4)項の現在値の表示、エラー条件のチェック、エラー発生時のストップ処理、エラー・メッセージの表示、フロント・パネル上の入力ボタン操作時の機能実行、ステッピング・モーターの初期化、およびエラー・チェック、RF周波数を-5Hz~ 5Hzの範囲内に調整するためのステッピング・モーターの制御を行う。その他、初期化後の時間およびRF位相ロック時間を CRTの欄外に表示する。

#### (4) ビデオ表示装置

本ユニットのビデオ・モニターは 8台の空洞と 2基のクライオスタットの各種状態を表示するためのもので、空洞モードとクライオスタット・モードの 2種類の画面を持っている。その画面は制御盤のスイッチ 1 (Fig. 2. 1. 36. 参照) によって切換えられる。

##### ① 空洞モードの場合

8台の空洞の内、選択された特定の 1台を点灯し、同時にその空洞について制御が可能となったことを示す。8台の空洞について以下のパラメータ類が表示される。

電界強度、RUN/位相ロック/RF周波数トラッキングの状態表示、位相ロック状態の保持時間率、連続運転/パルス運転/OFF状態の運転モード表示、制御振幅"AMPLITUDE"と10Vからの誤差、基準周波数に対する発振周波数の誤差、INPUT GAIN、LOOP PHASE、PHASE REFERENCE、AMPLITUDE REFERENCE、振幅および位相のフィードバックゲイン、チューナーとカップラーの設定値等である。

##### ② クライオスタット・モードの場合

2基のクライオスタットについて内部の熱シールドおよび空洞の温度、そして液体ヘリウム、液体窒素の液面とその消費量を表示する。

ビーム入口、出口および真空ポンプ入口の真空バルブの開閉状態、および真空度を表示する。しかし現在のところこれらの表示は利用していない。

4重極電磁石 X、Y 軸コイルの設定電圧、および読出し電圧を表示する。ただし、現在読出し電圧の表示は利用していない。

#### (5) 制御盤

(4) 項で示した制御を行うための制御盤で、LED付ボタン・スイッチのON、OFFにより各種制御を行う。Fig. 2. 1. 36 に制御ユニット制御盤とスイッチの機能 (説明文) を示す。下部および背面には他空洞や回路の調整に有益なモニター信号類のBNC端子出力がある。また、背面パネ

ルにはRS232Cポートがあり外部端末からリモート操作できる。

#### (6) タンデム加速器制御システムとの接続

ブースターのRF制御については加速空洞の位相や加速電圧の制御性能が適当でかつタンデム制御システムに容易に接続できるものが得られなかったため、当面の使い勝手と入手性を再優先してASI社の制御装置を選択した。しかし、当然のことながらタンデム加速器と超電導ブースターとの連携運転を円滑に行うためには2つを同時に制御できるコントロールステーションが必要である。そのため2つの加速器を統合した制御システムが望まれる。接続の方針として、タンデム加速器の制御システムの末端のインターフェイスとしてRFシステムのデータ点を扱えるようにすることにした。

ASI社のコントローラは16ビットのマイクロ・プロセッサによってコントロールされるが、もともと他の制御システムと接続するような設計になっていない。このコントローラは2つのRS232Cインターフェイスをもっている。そのうち一つはそれ自体の制御パネルとは別のところでモニターまたは制御するためのCRT端末接続用であり、もう一方は現在使用されていない。通信ポートとしてこの残りのRS232Cインターフェイスを使用する。コントローラのソフトウェアにこのポートから遠隔制御するための機能を追加する。一方、タンデム制御システム側にはRS232Cインターフェイスを持ったプロセッサを新たに設けてプロトコル変換を行い、タンデム制御システムの中央プロセッサからはこのプロセッサがシリアル・ハイウエイドライバと同様に見做せるようにする。こうするとタンデム制御システムにあまり大きな変更を加えずに、RF制御を組み込むことができる。

#### 参考文献

- [1] H. Padamsee, Proc. of the Second Workshop on RF-Superconductivity, Geneva (1984) p339
- [2] J. Halbritter, Z. Physik 238(1970)466
- [3] J. Halbritter, Proc. of the Second Workshop on RF-Superconductivity, Geneva (1984)p427
- [4] H. A. Schwettman, J. P. Turneure and R. F. Waites, J. Appl Phys. 45(1974)914
- [5] S. Takeuchi, T. Ishii H. Ikezoe, Nucl. Instr. and Methods A281(1989)426
- [6] B. Aune, B. Bonin, J. M. Cavedon, M. Juillard, A. Godin, C. Henriot, Ph. Leconte, H. Safa, A. Veyssiere and C. Zylberajch, Proc. 1990 Linear Accelerator Conf., Albuquerque, CA-12004-C, p253
- [7] T. Ishii, M. Shibata and S. Takeuchi, Nucl. Instr. and Methods A328(1993)231
- [8] B. Bonin and R. W. Roeth, Proc. of the 5th Workshop on RF Superconductivity, Hamburg (1991)p210
- [9] 富田芳明、石井哲朗、竹内末広、菊池士郎、峰原英介, JAERI-M 88-155(1988)
- [10] S. Takeuchi and K. W. Shepard, Nucl. Instr. and Methods 227(1984)217
- [11] J. R. Delayen, Thesis: "Phase and Amplitude Stabilization of Superconducting Resonators", California Institute of Technology, California(1977)

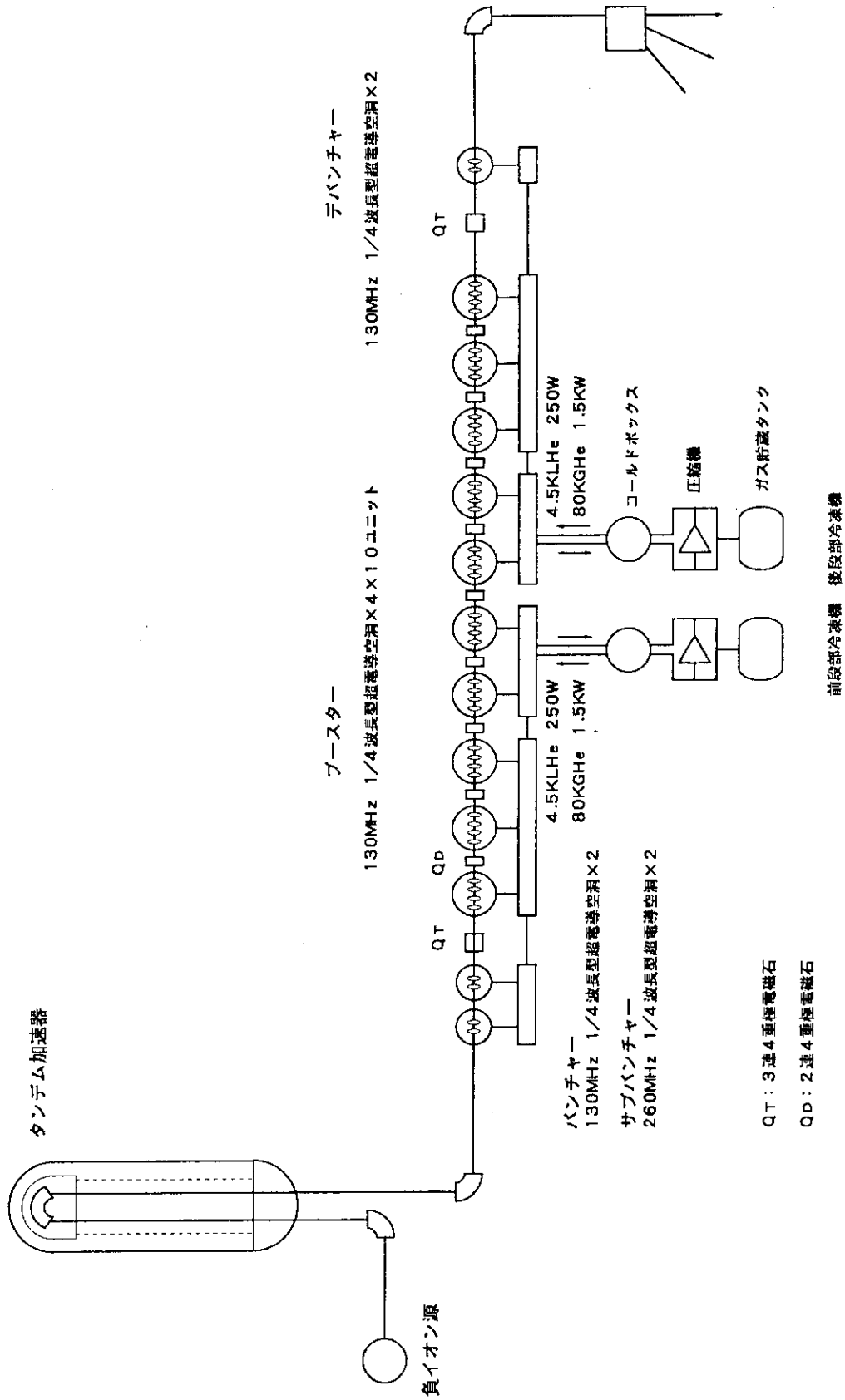


Fig. 2.1.1 ブースター本体構成概念図



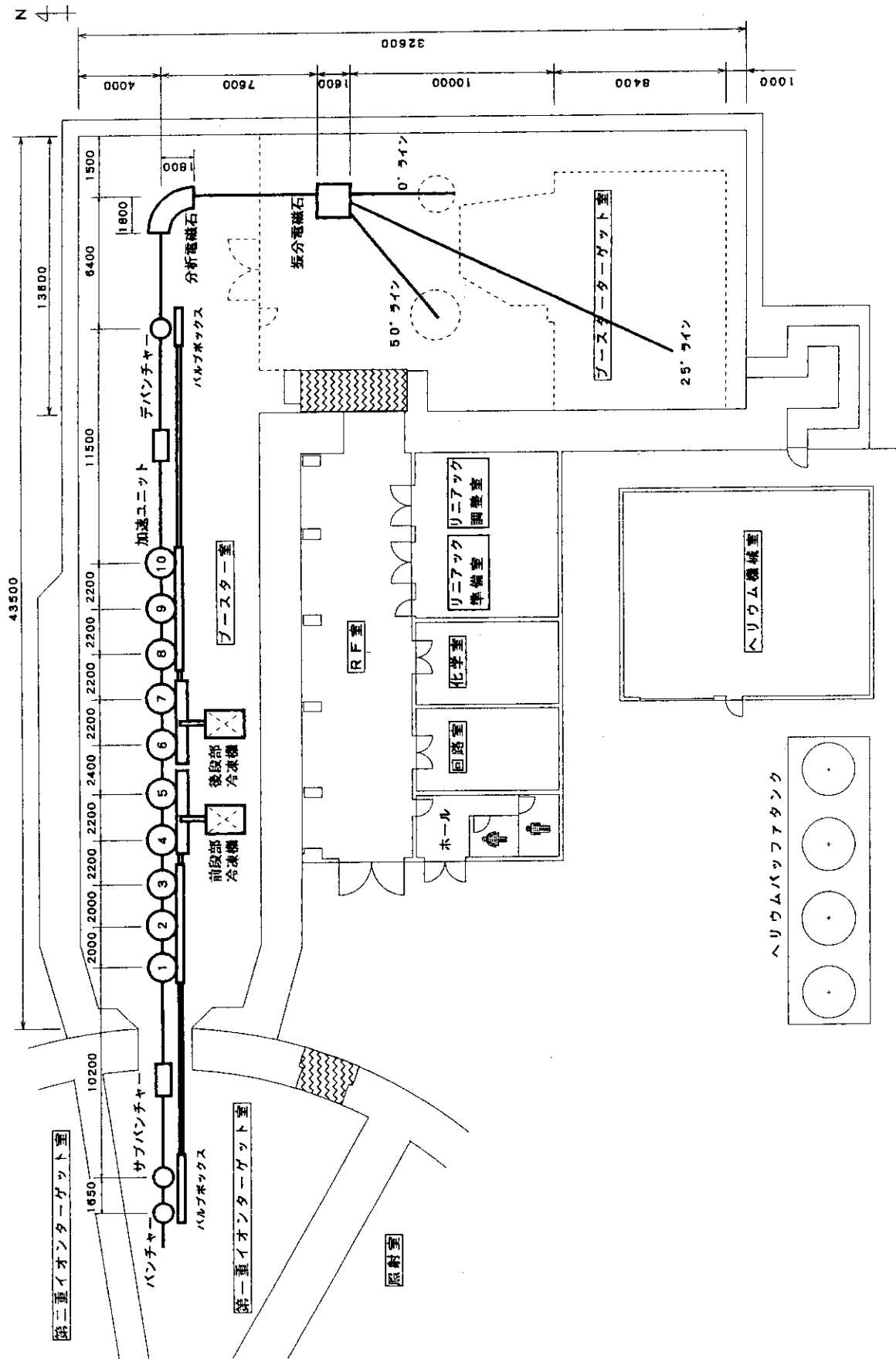


Fig. 2.1.2 ブースター主要機器配置図

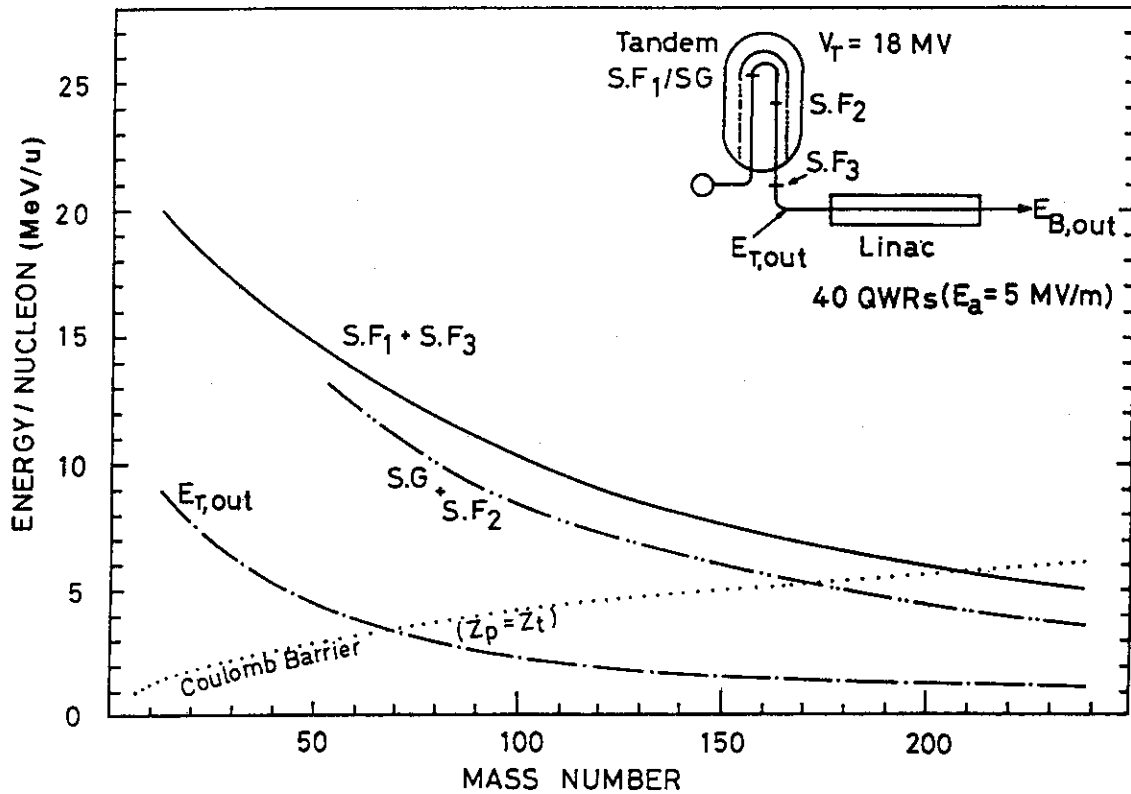


Fig. 2.1.3 ブースターのエネルギー性能

SF1, SF2, SF3, は図に示した位置に設置した荷電変換炭素薄膜を使用することを意味し, SGはガスによる荷電変換の意味である。

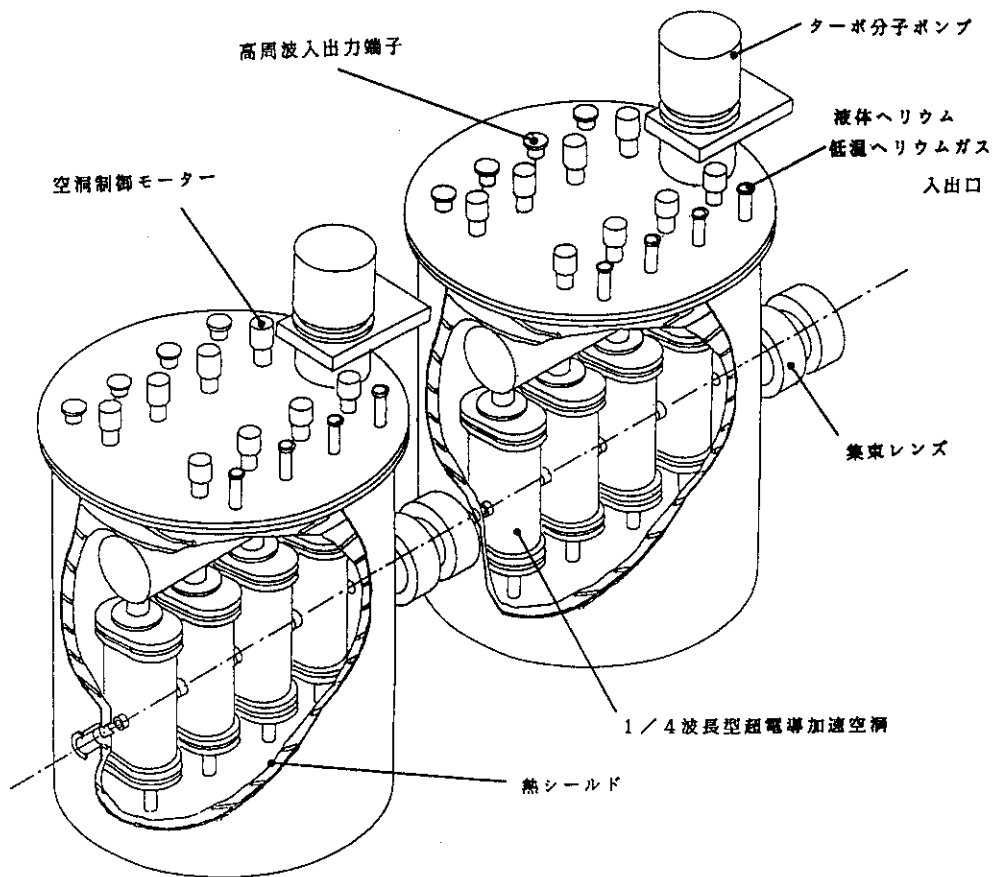


Fig. 2.1.4 加速ユニット概念図 (2基)

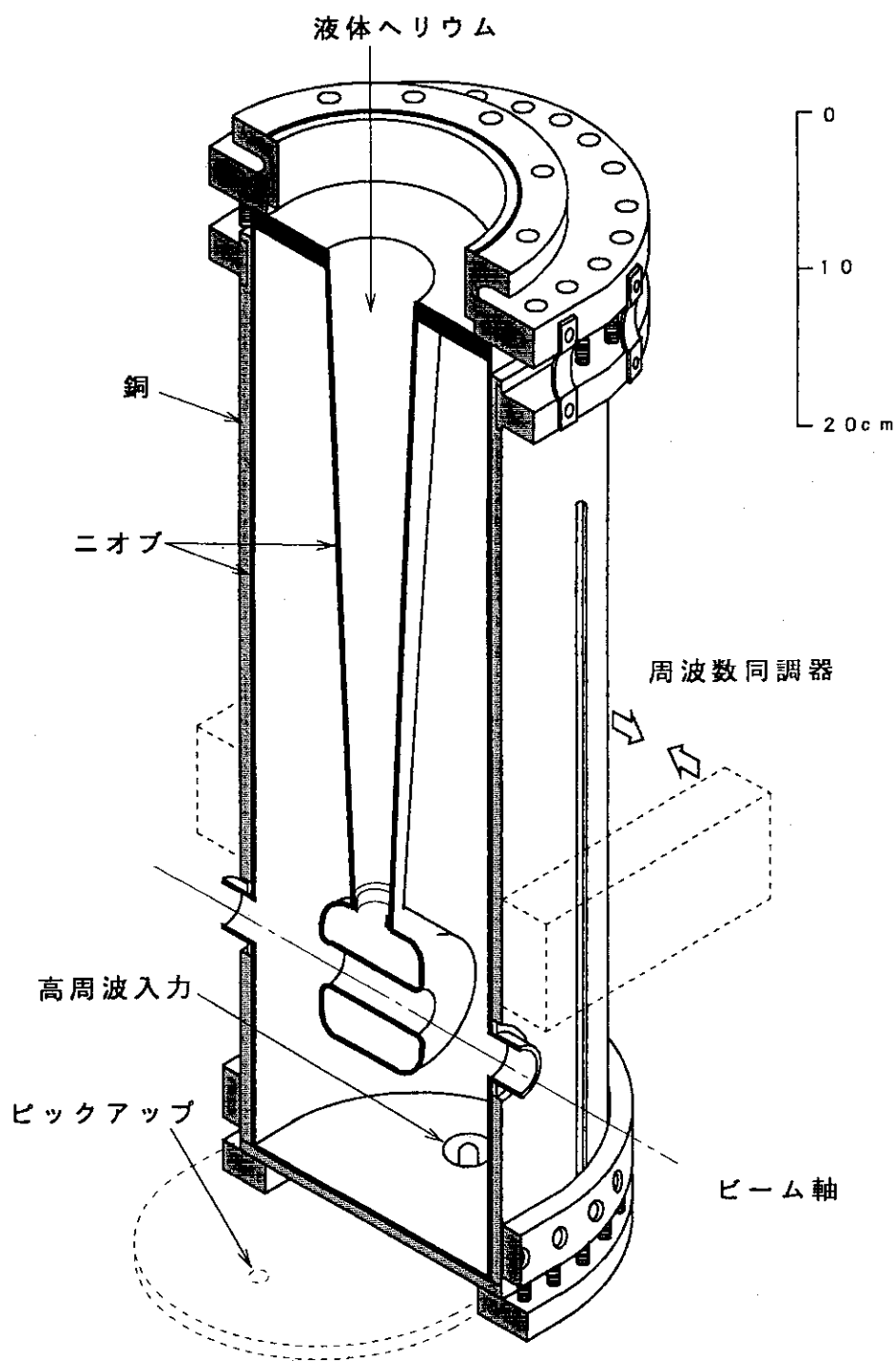


Fig. 2.1.5 1/4波長型超電導加速空洞

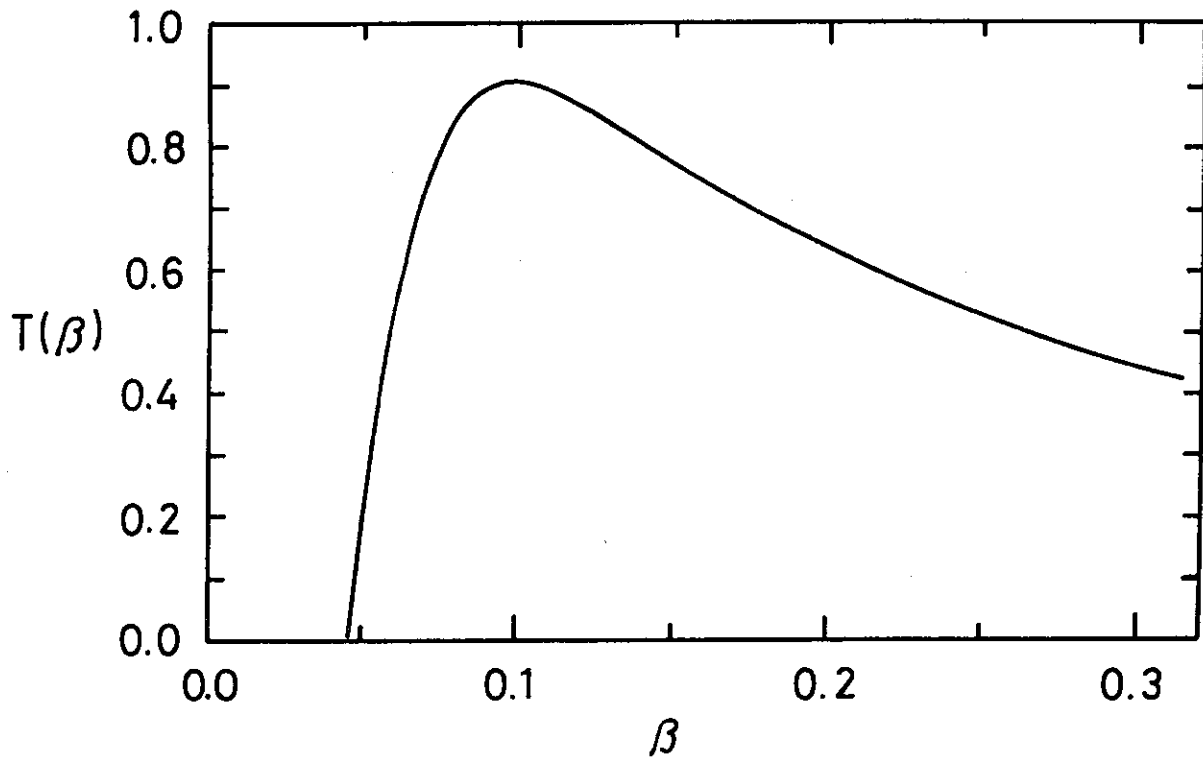


Fig. 2.1.6 通過時間因子  
 ただし、 $\beta = v/c$ 、 $v$ はビームの速度、 $c$ は光速である。

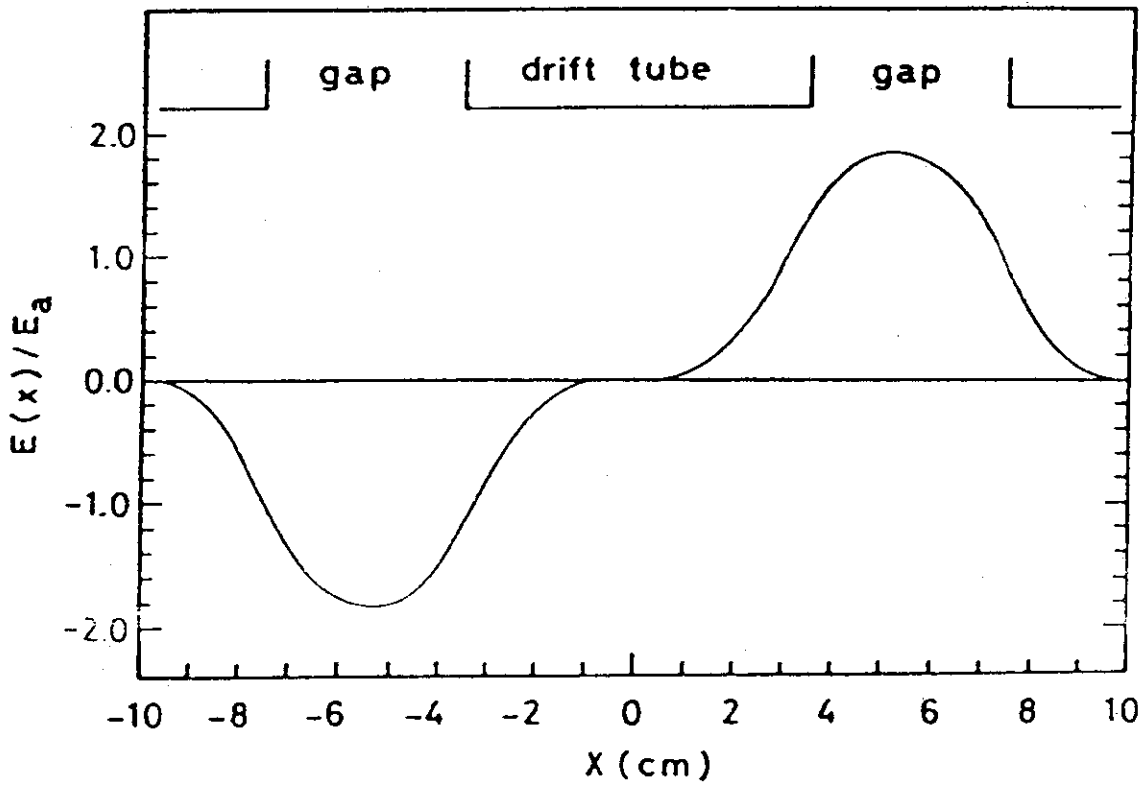


Fig. 2.1.7 ビーム軸上の加速電界強度



空洞の製作過程

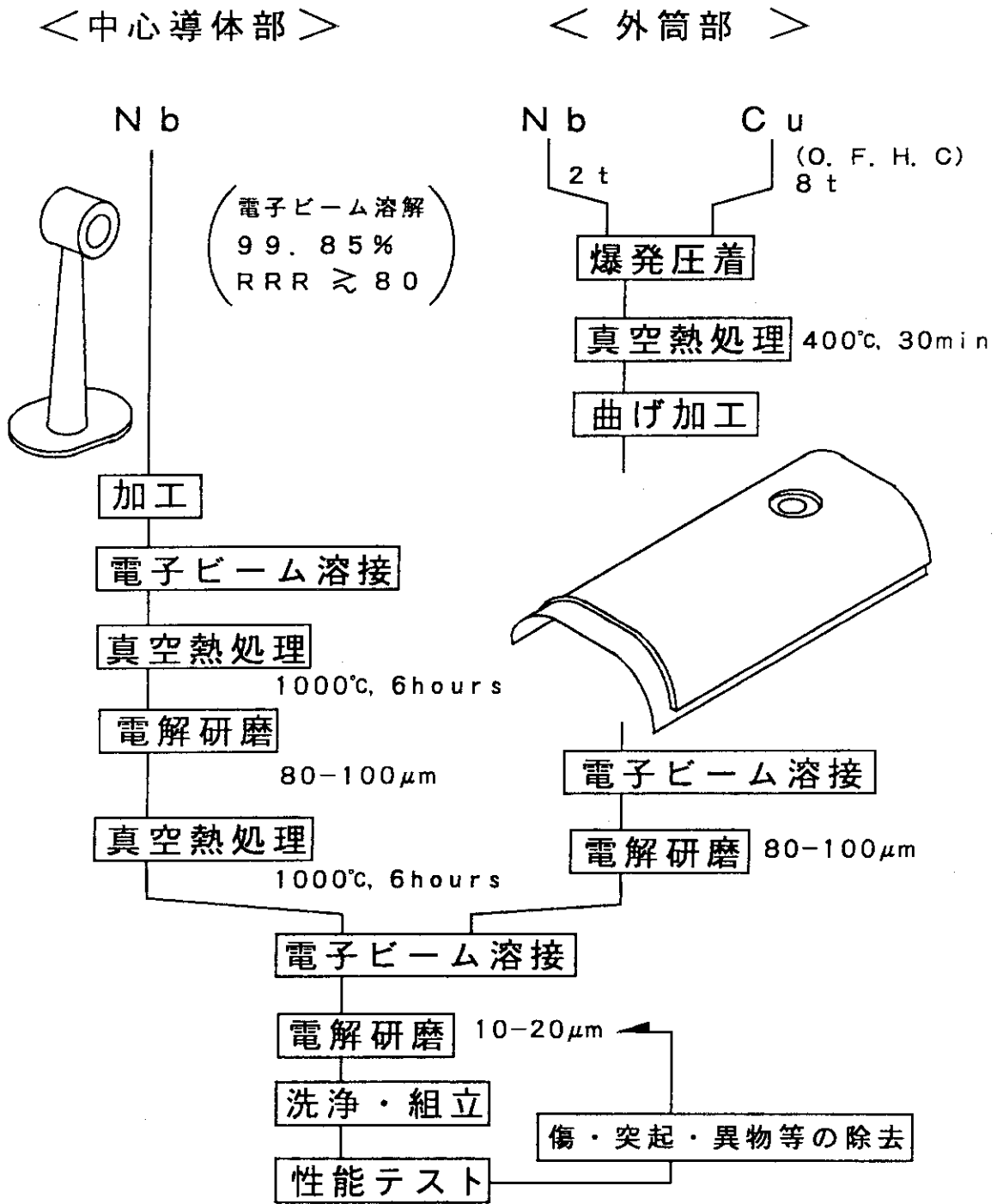


Fig. 2.1.9 空洞の製作過程概要

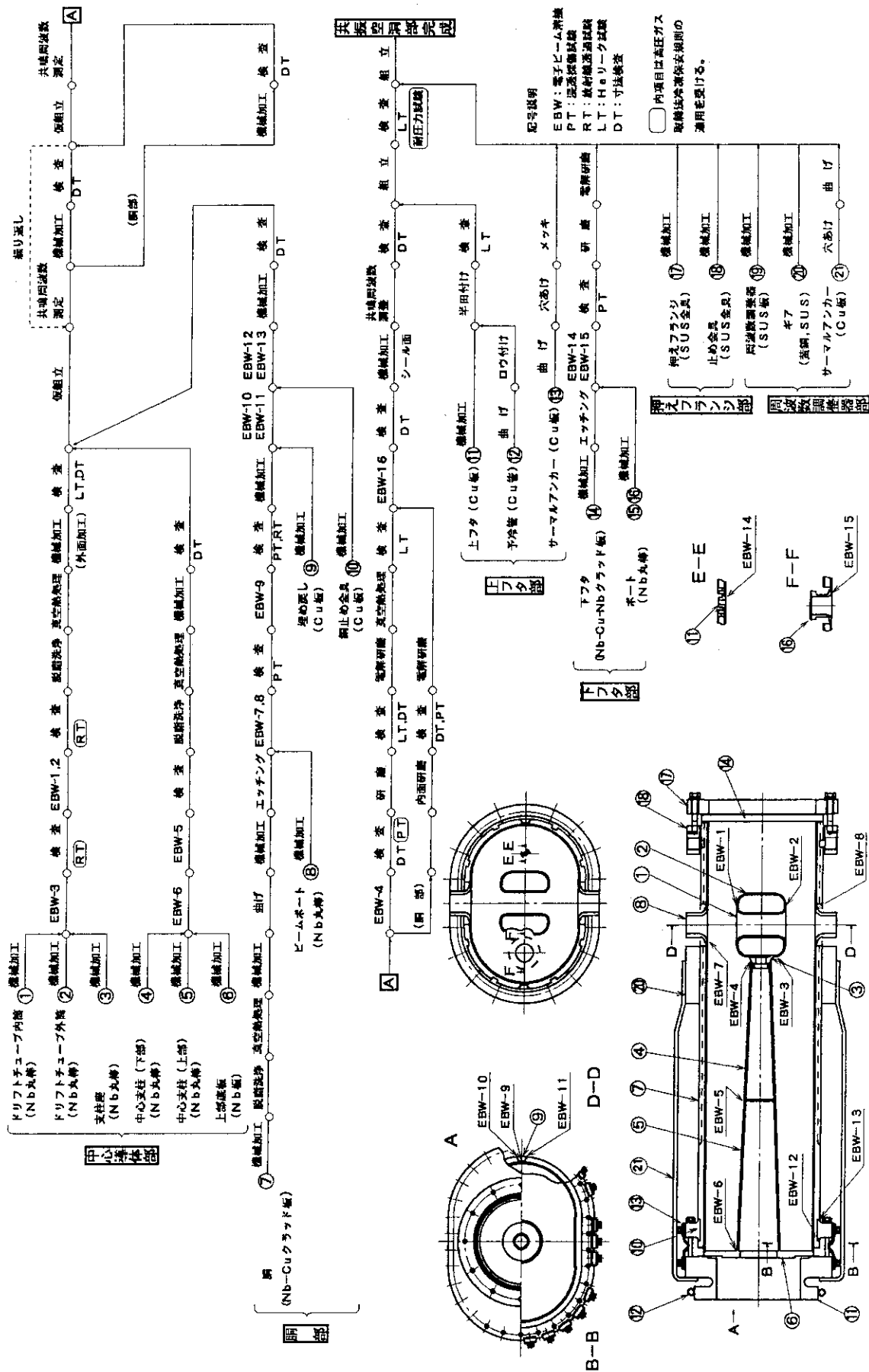


Fig. 2.1.10 超電導空洞の製作手順

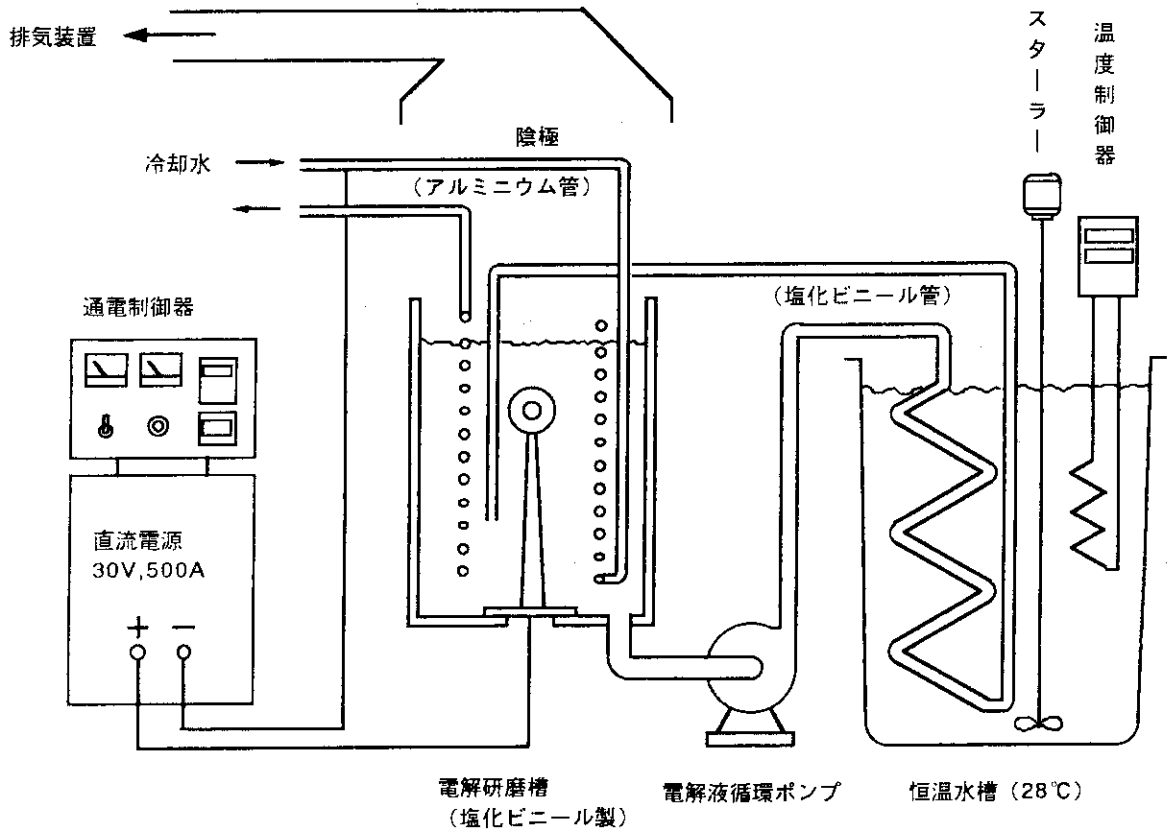


Fig. 2.1.11 電解研磨の装置の構成

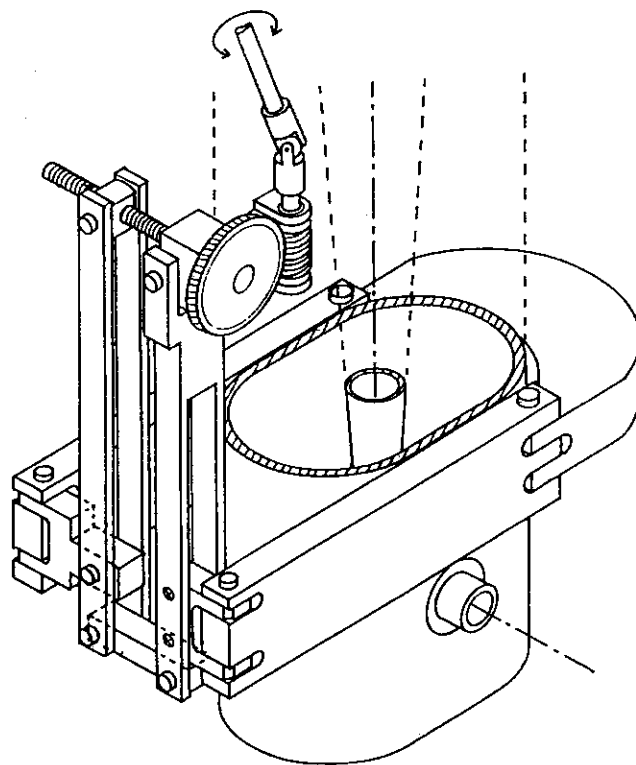


Fig. 2.1.12 周波数同調機



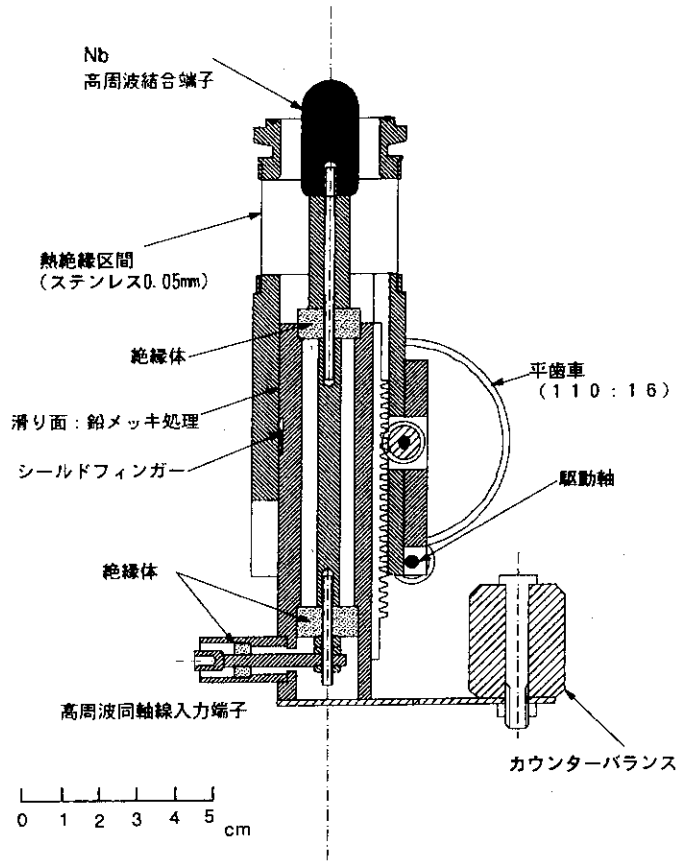


Fig. 2.1.13 高周波入力結合器 (断面図)

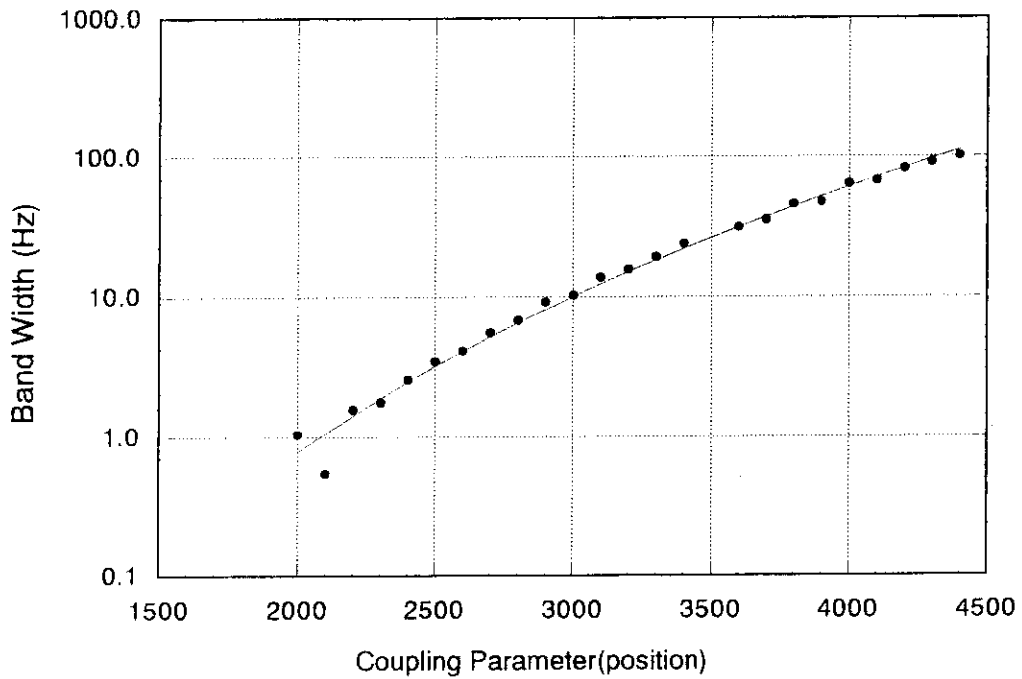


Fig. 2.1.14 高周波入力結合器の位置変数とバンド幅の関係

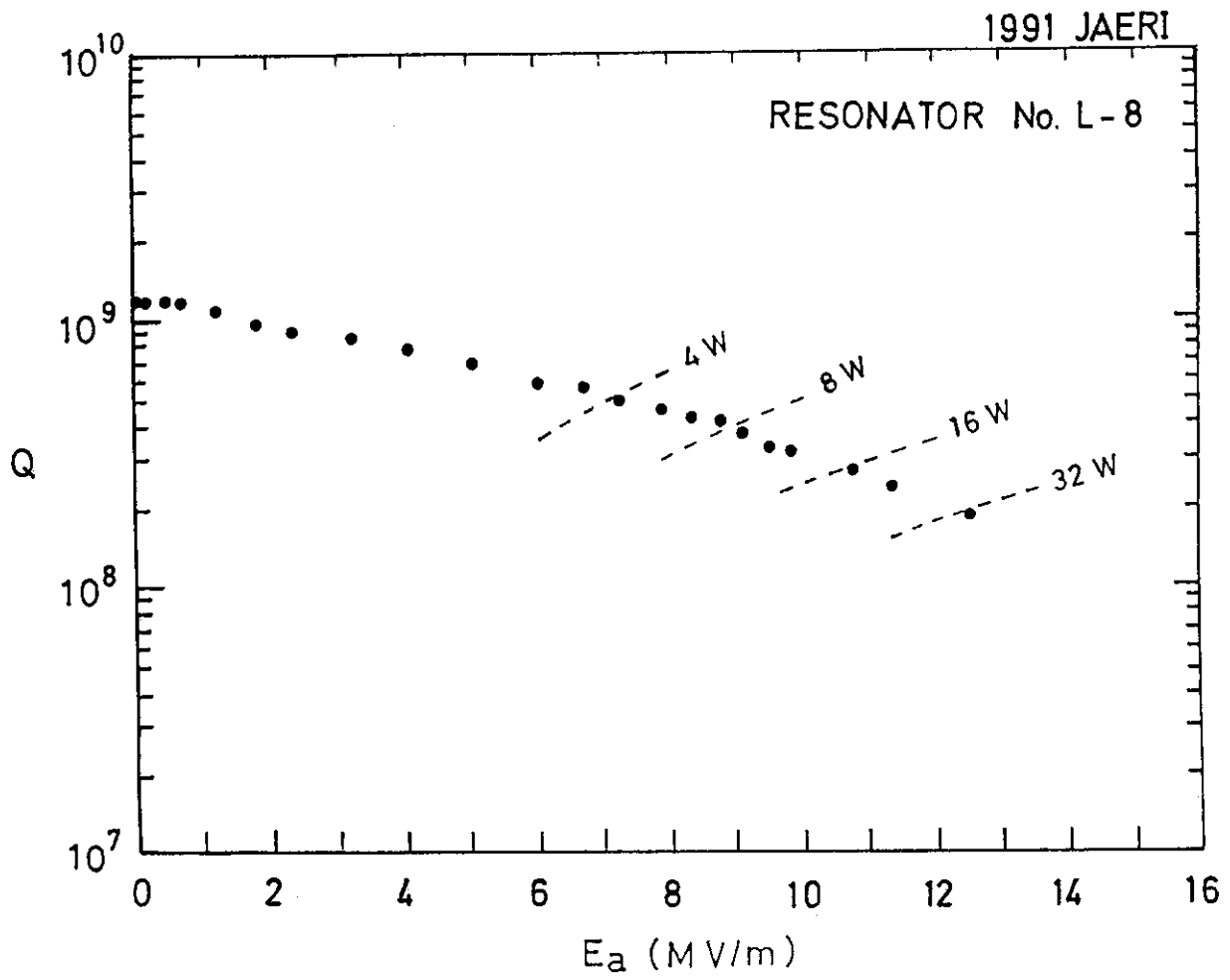


Fig. 2.1.15 130MHz超電導空洞の特性 ( $Q_0$ - $E_0$ 曲線) の一例



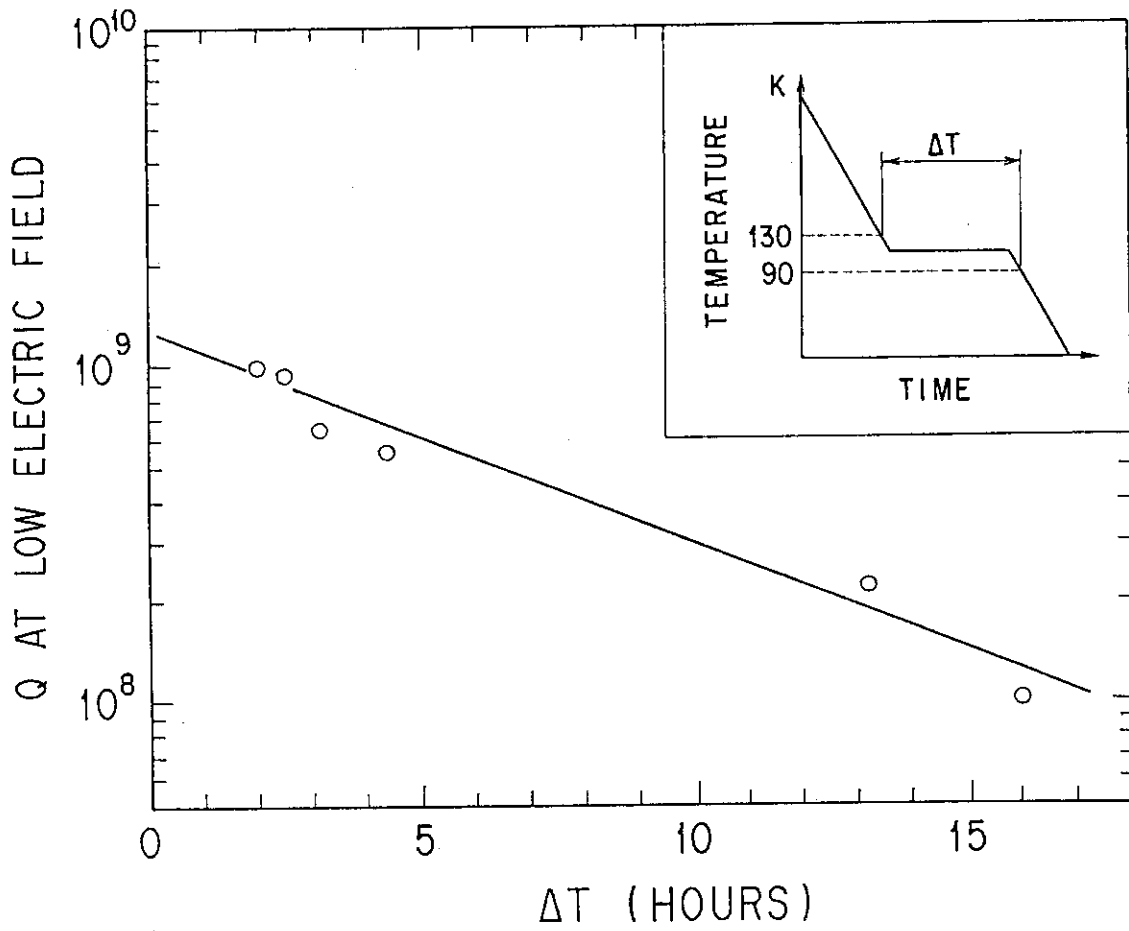


Fig. 2.1.17 空洞の冷却中130-90Kの温度範囲に保持した時間に対する低い電界におけるQ値

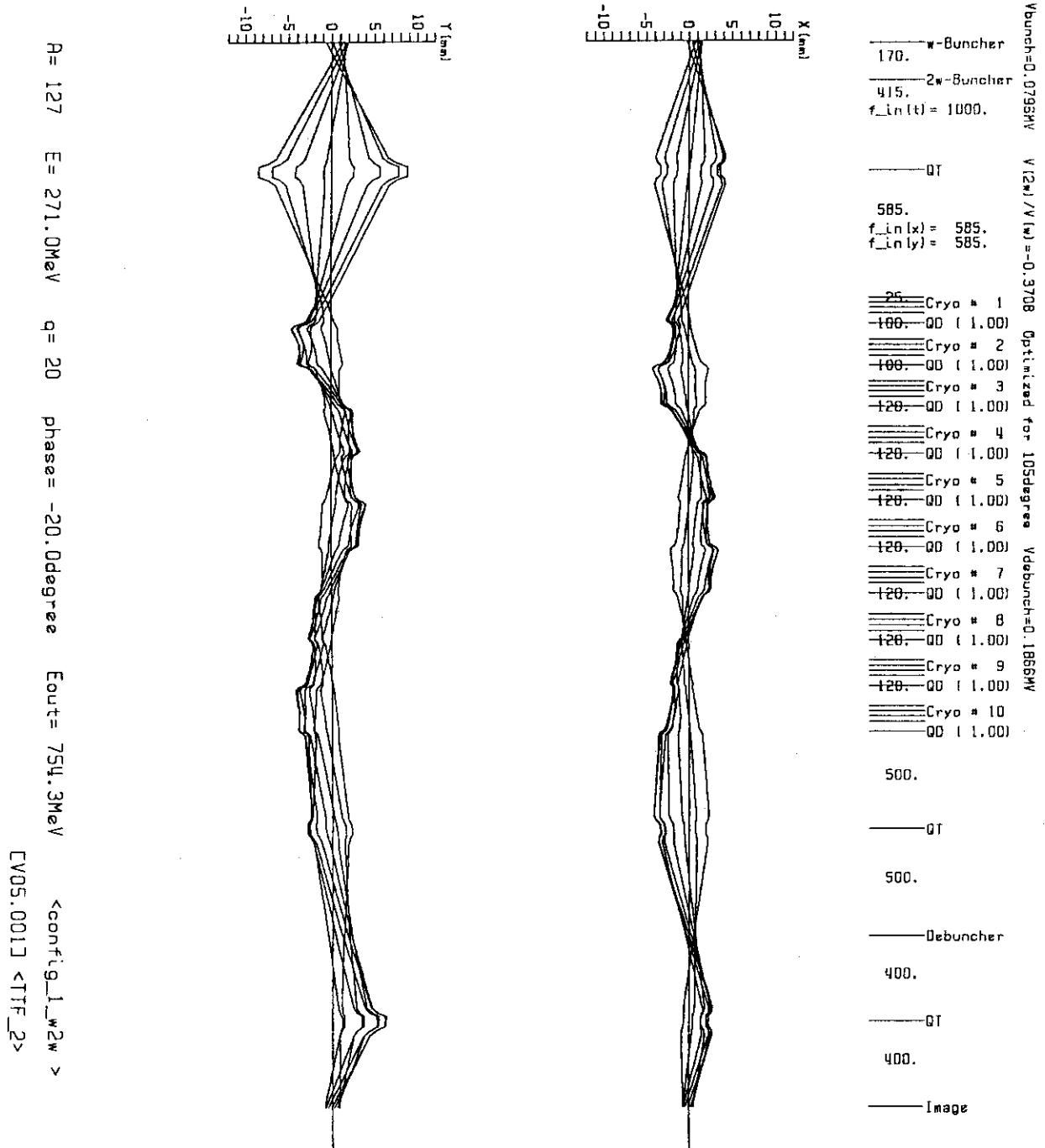


Fig. 2.1.18  $^{127}\text{I}$ ビームのうちシンクロンビームがブースターを通過するときの空間的広がり

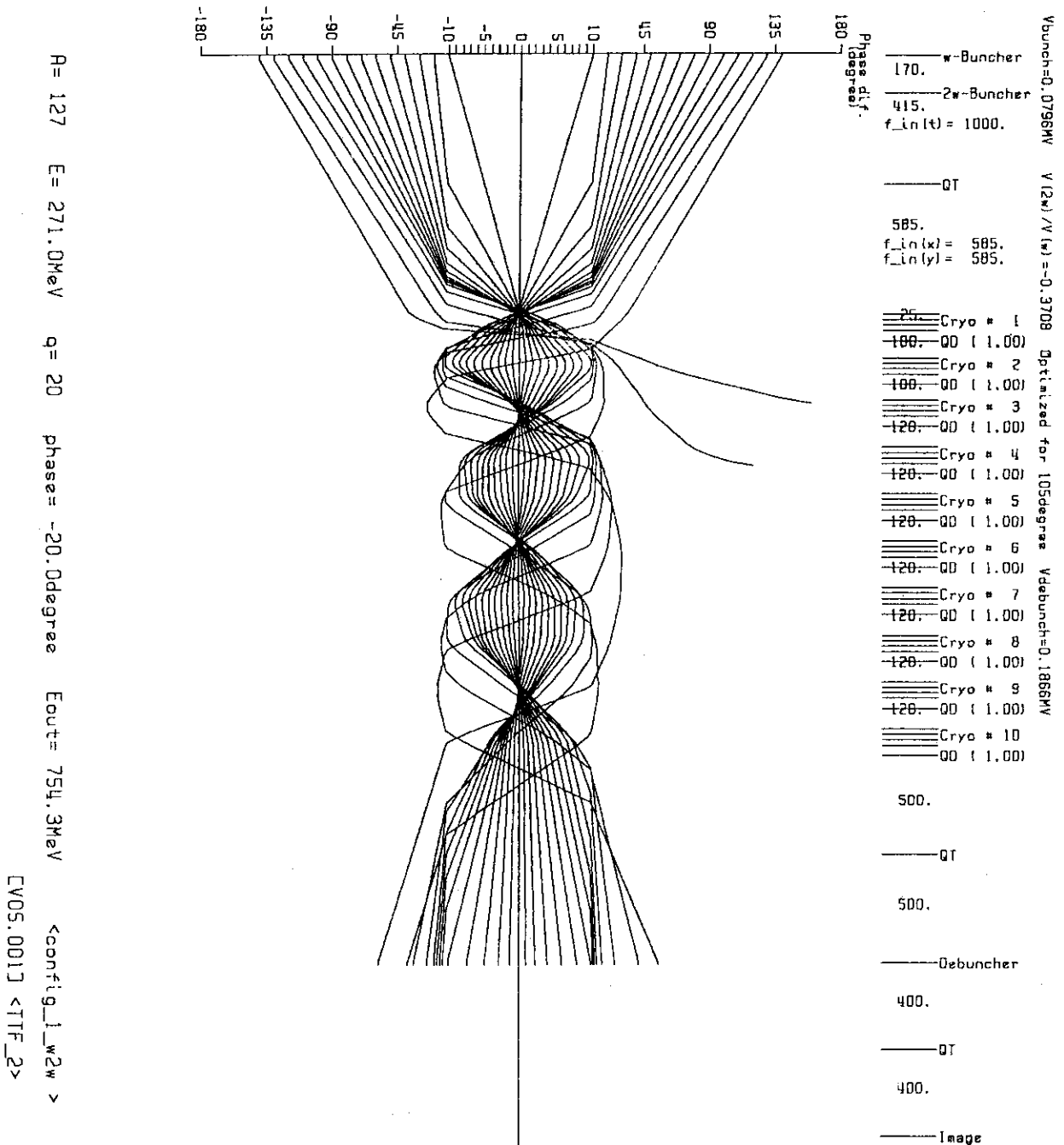


Fig. 2.1.19 <sup>127</sup>Iビームの位相バンチング  
 縦軸は各点におけるシンクロナスビームとの時間差を位相角度で表している。

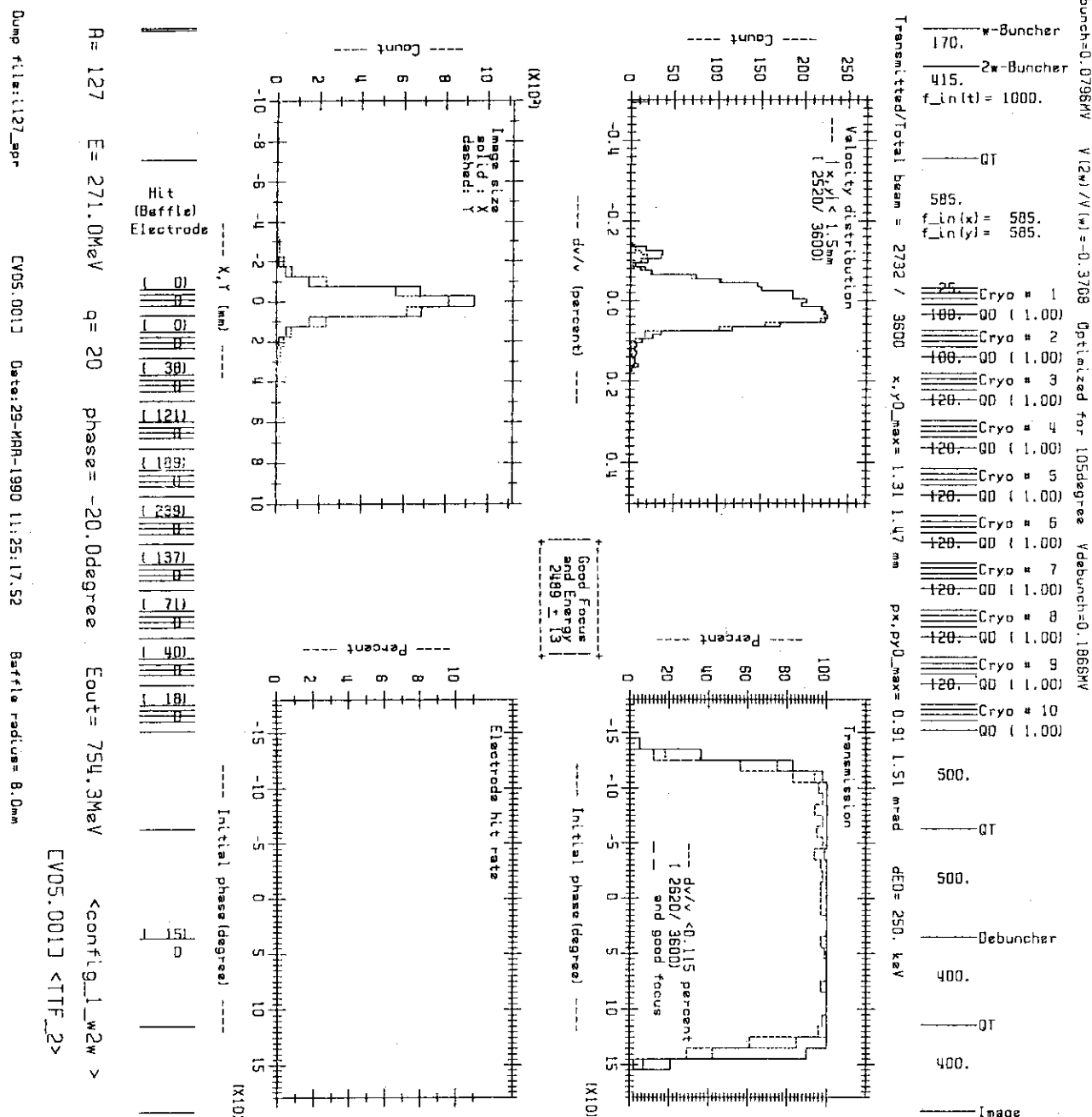


Fig. 2.1.20 <sup>127</sup>Iビームのイメージ点での速度分布，空間分布，初期位相に対する通過率および空洞の電極に当たる率

Dump file: c12\_apr CV05.0013 Date: 29-MAR-1990 13:31:40.47 Baffle radius= 8.0mm

A= 12 E= 116.0MeV q= 6 phase= -20.0degree Eout= 233.2MeV <config\_1\_w2w >  
 Phi\_D file: err\_1\_10 CV05.0013 <TTF\_2>

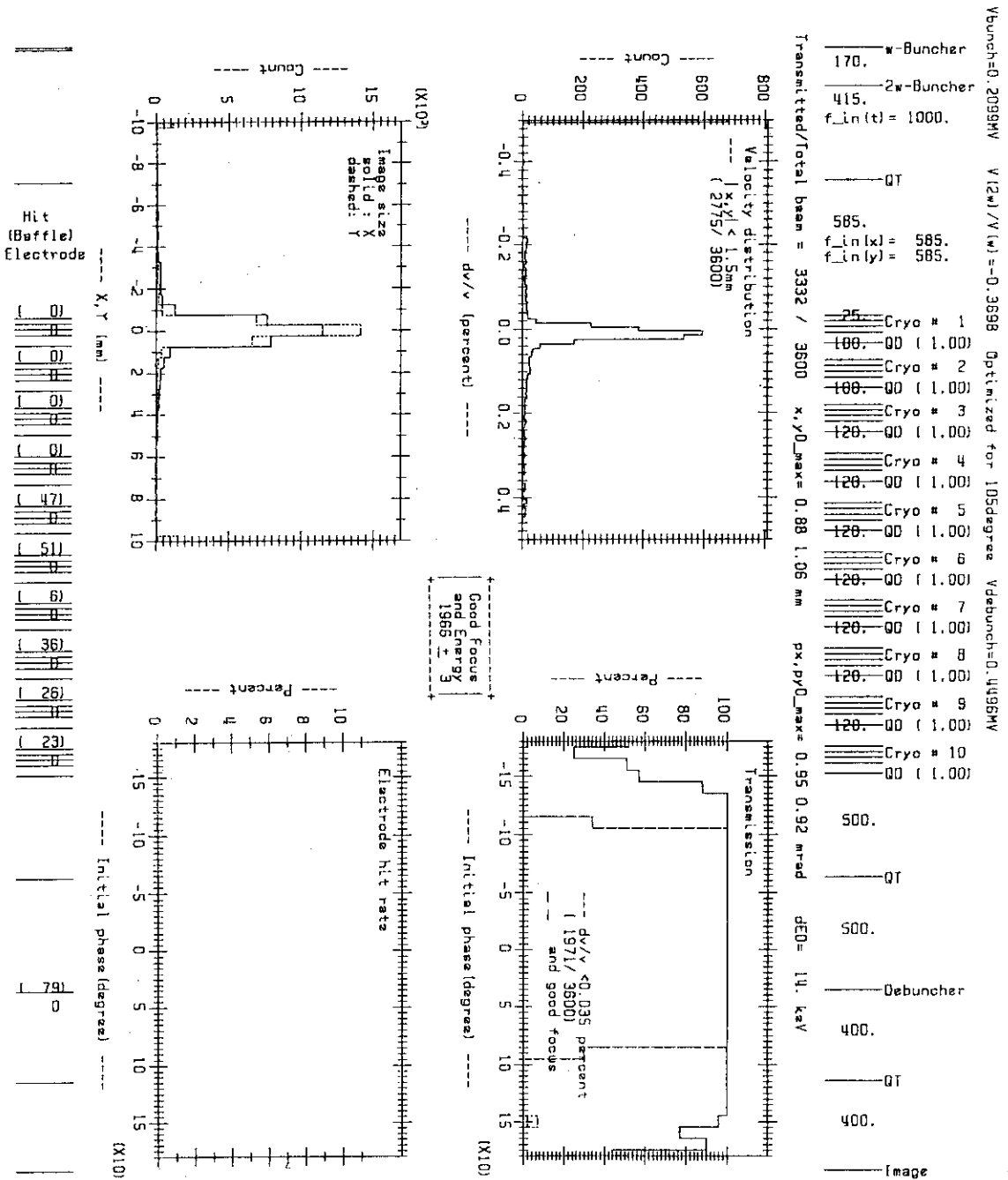
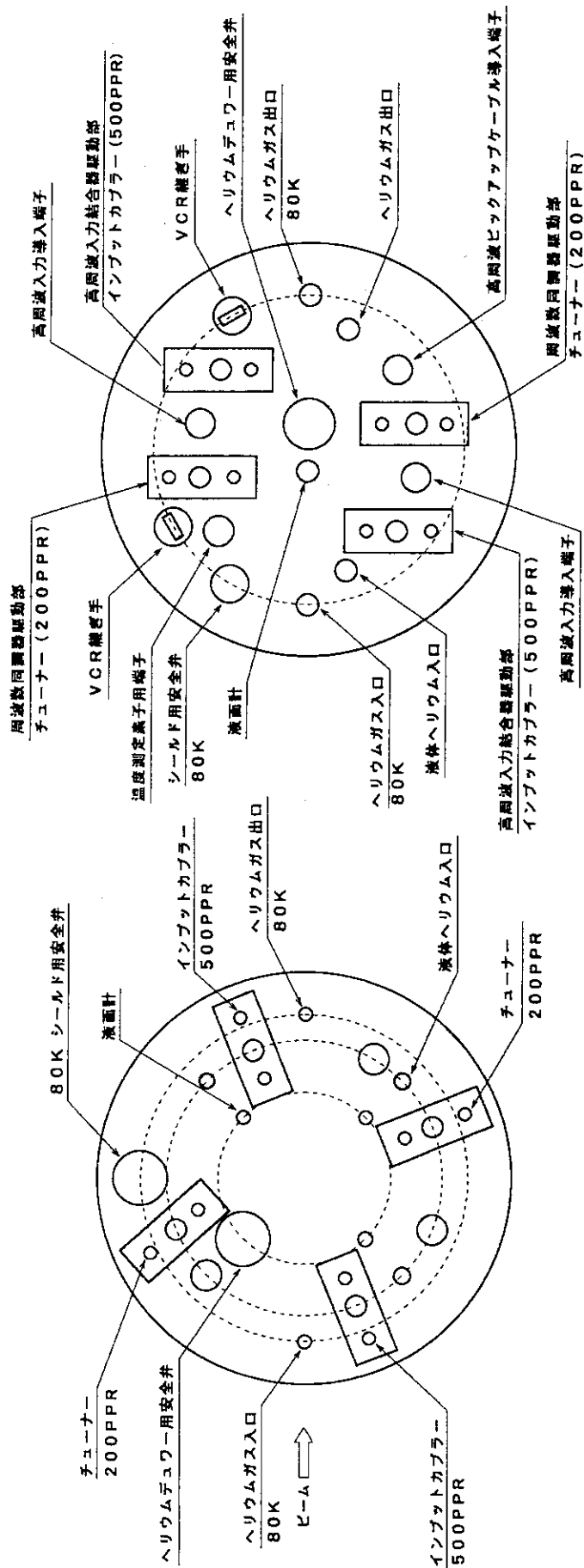


Fig. 2.1.21 <sup>12</sup>Cビームのイメージ点での速度分布，空間分布，初期位相に対する通過率および空洞の電極に当たる率





N  
4  
4



a) バンチャ上蓋ポート配置図      b) サブバンチャ上蓋ポート配置図

Fig. 2.1.23 バンチャおよびサブバンチャの上蓋ポート

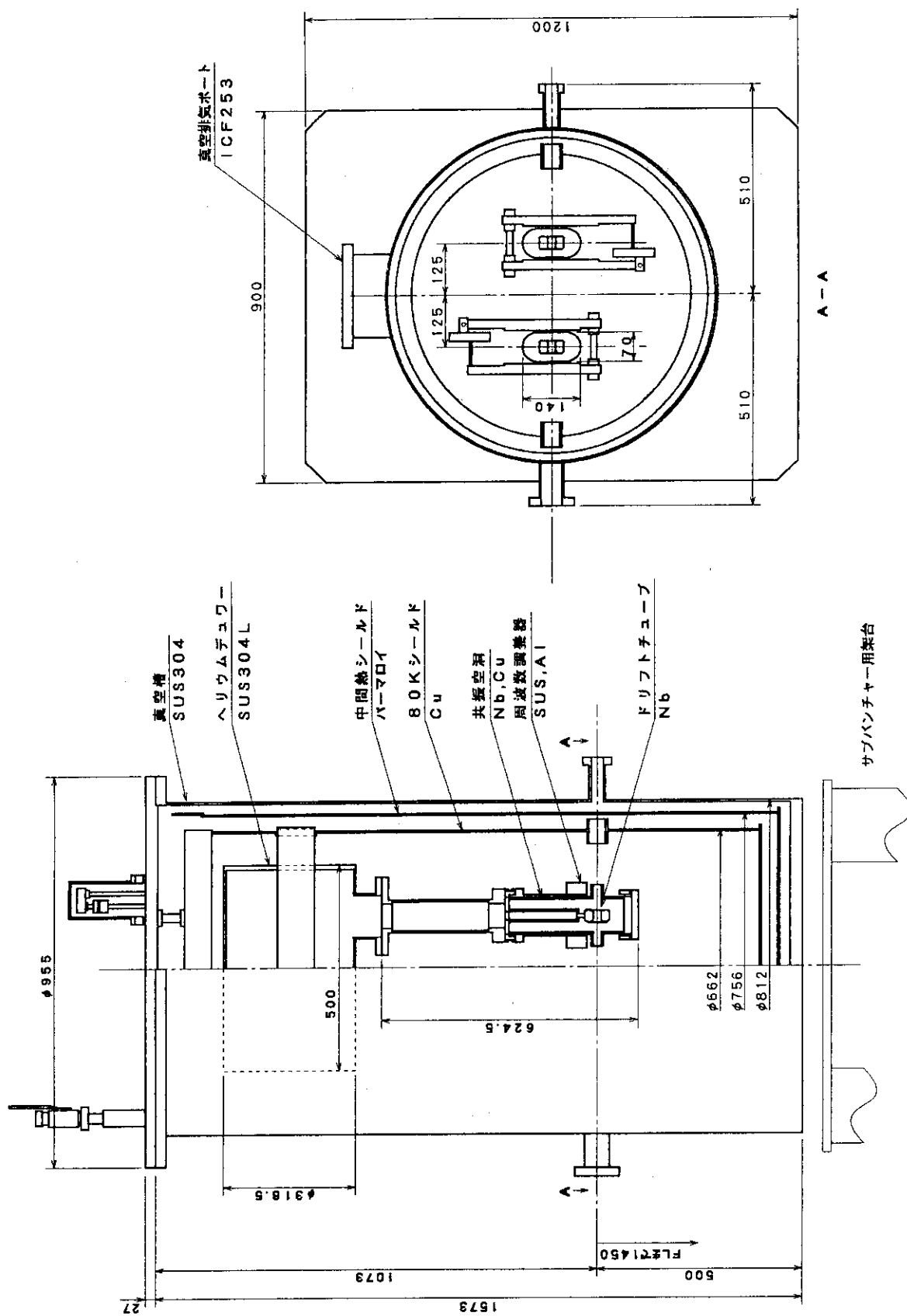


Fig. 2.1.24 サブパンチャー断面図

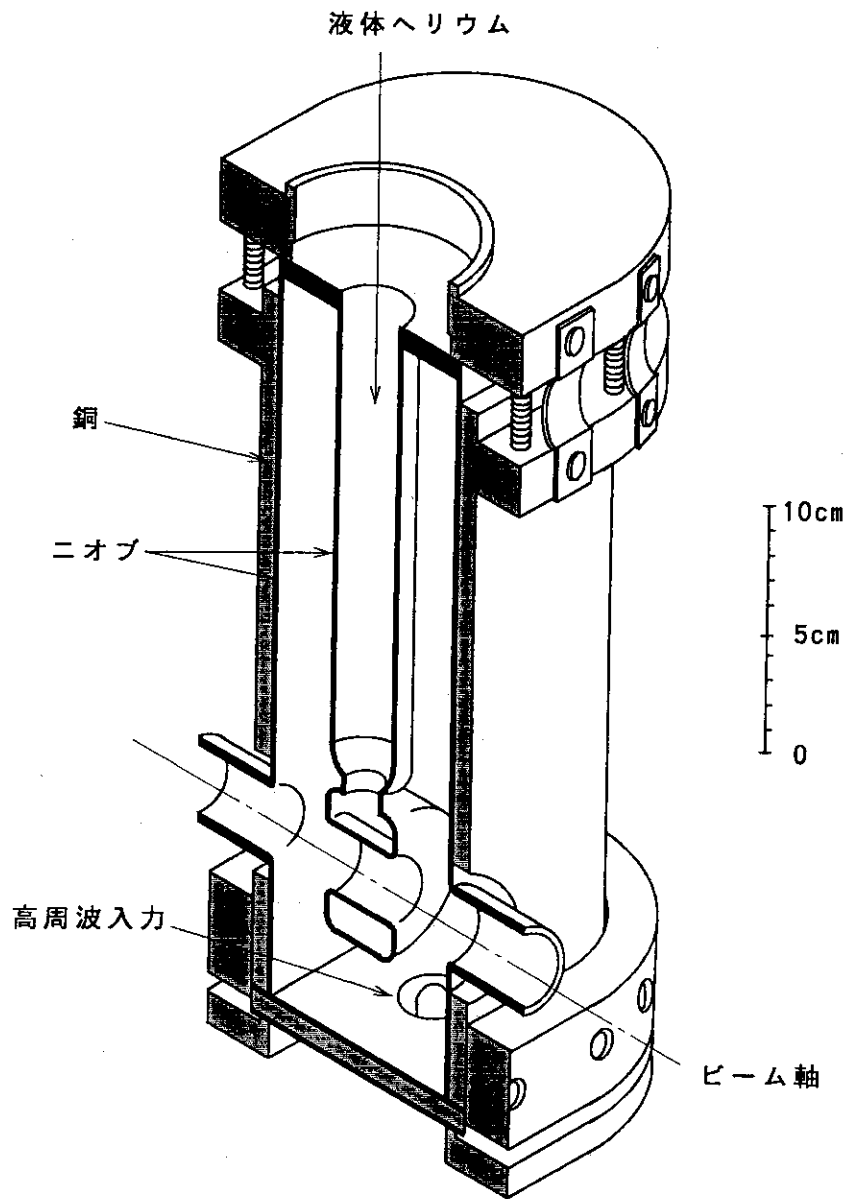


Fig. 2.1.25 260MHz超電導空洞

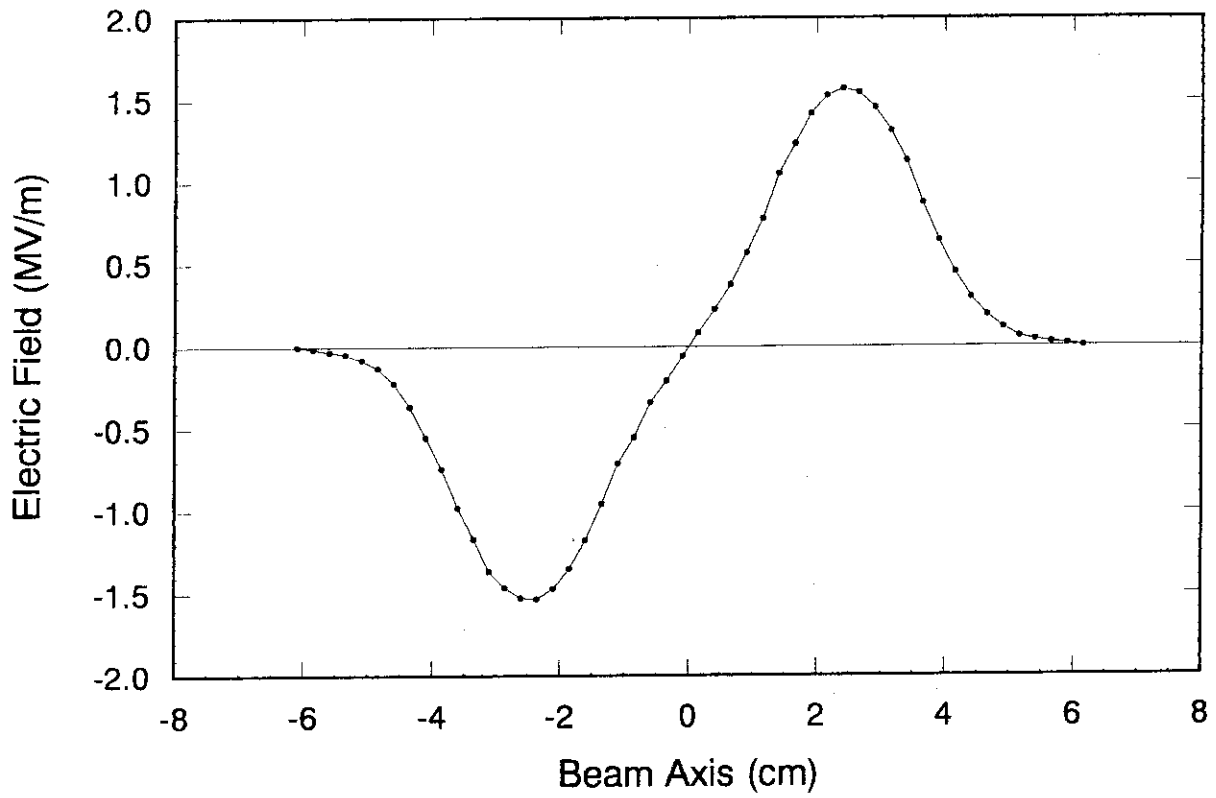


Fig. 2.1.26 260MHz超電導空洞のビーム軸上の加速電界強度 ( $E_a = 1 \text{ MV/m}$ とする)

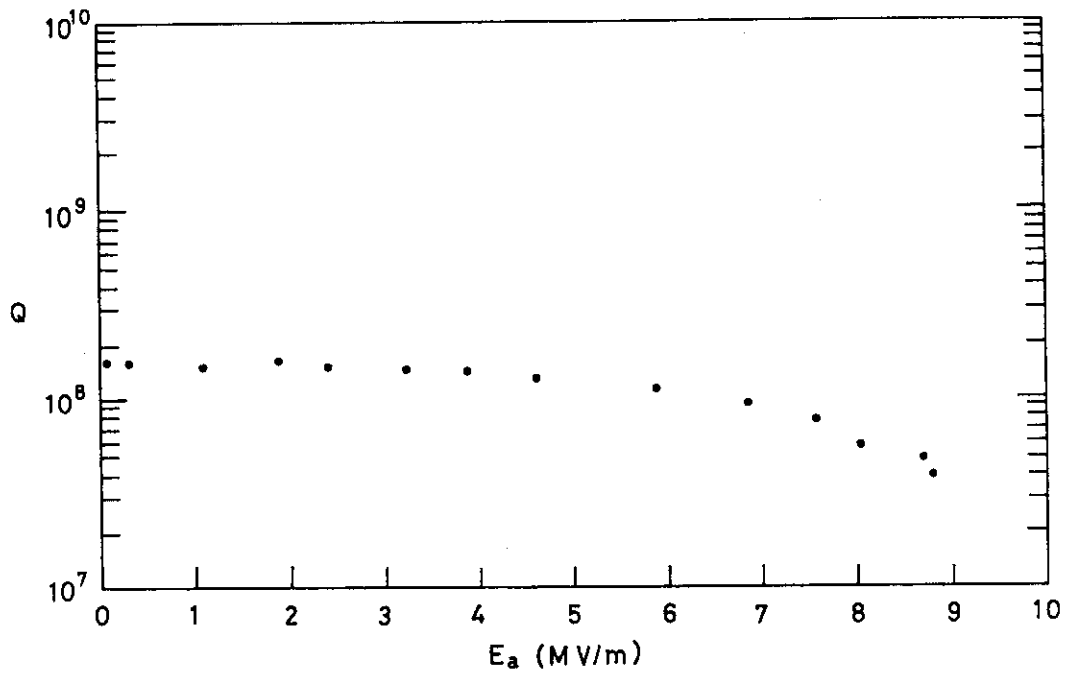


Fig. 2.1.27 260MHz超電導空洞のQ-E<sub>a</sub>曲線 (一例)

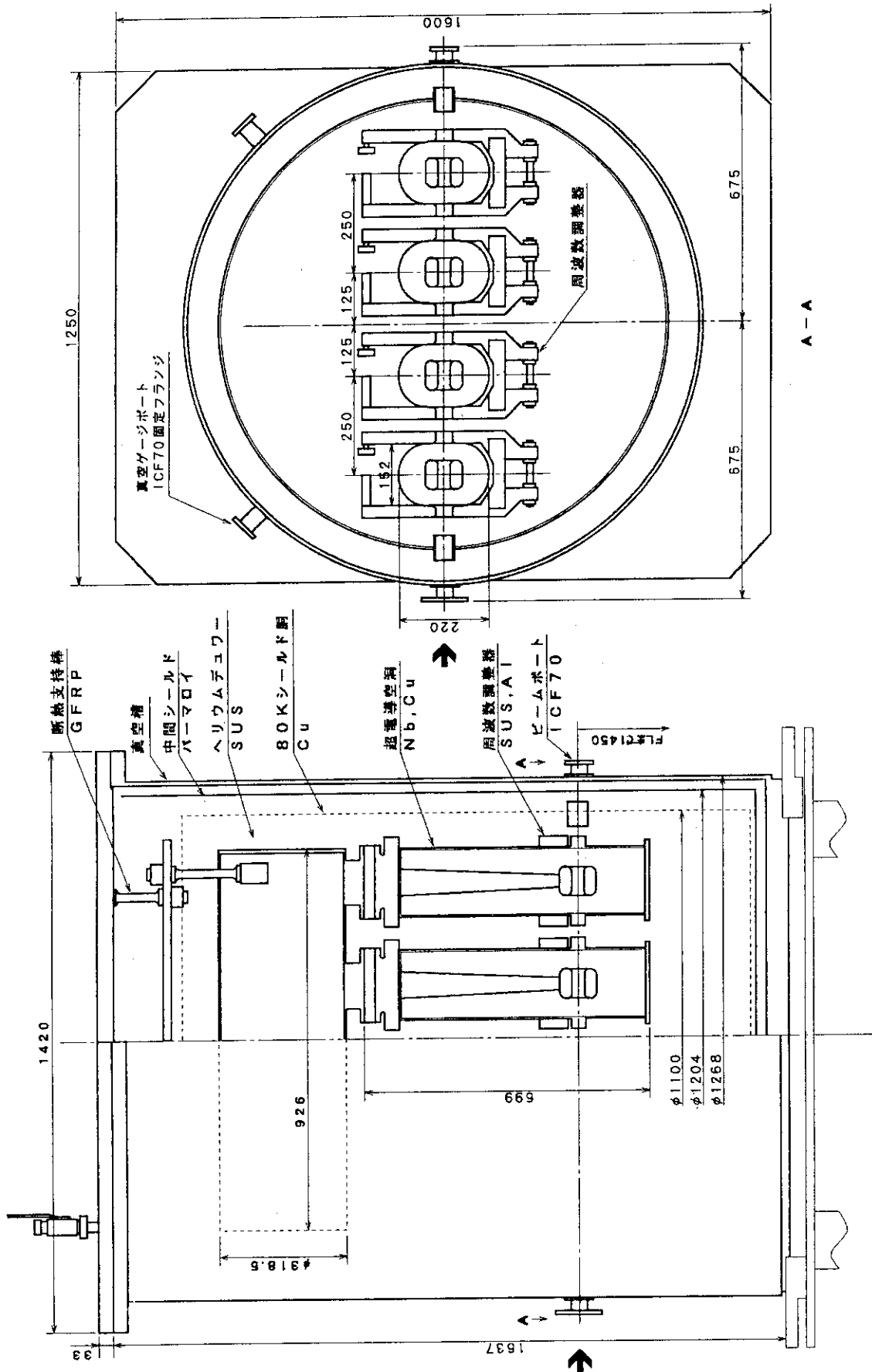


Fig. 2.1.28 加速ユニット断面図

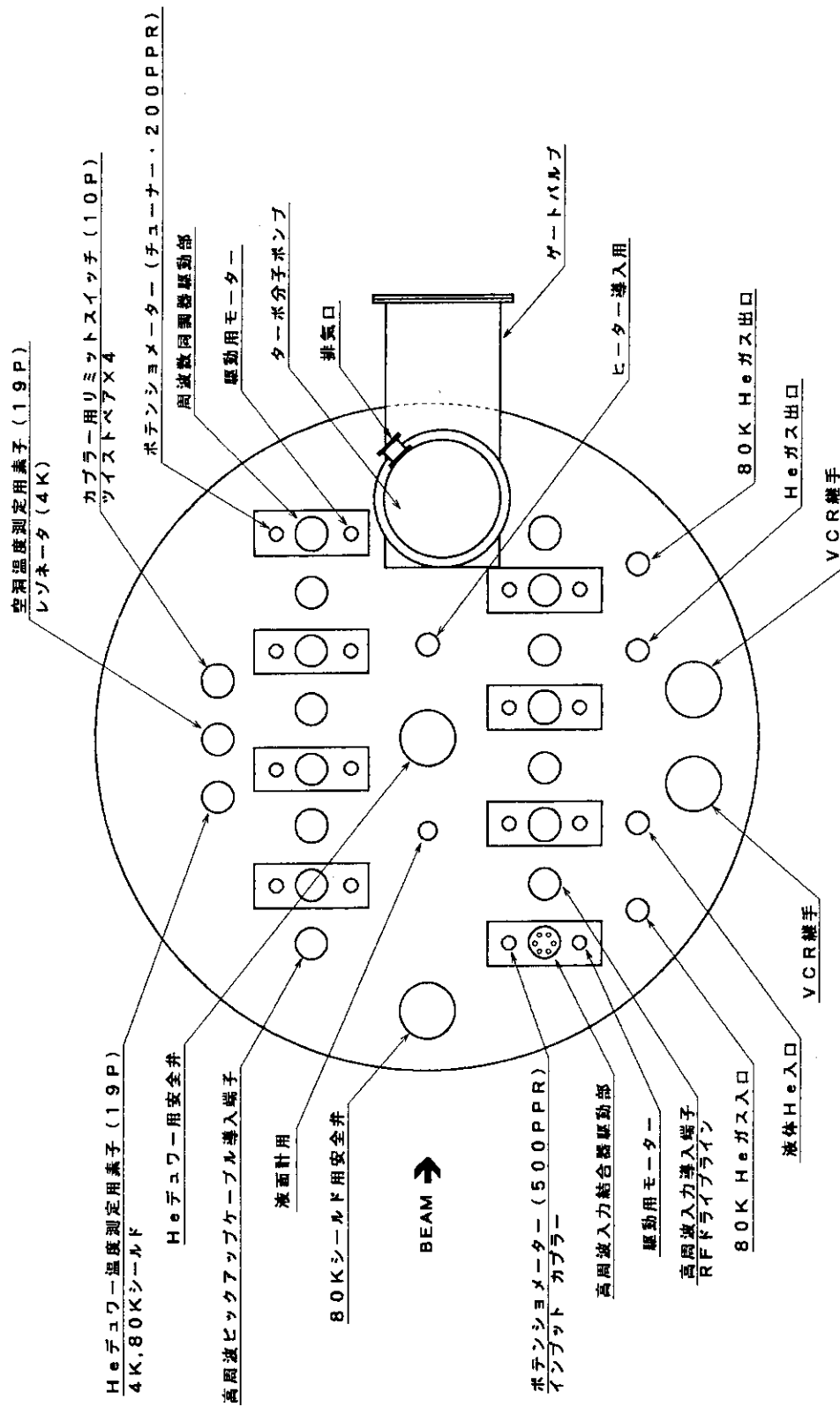


Fig. 2.1.29 加速ユニット上蓋ポート配置図

N型コネクターへ

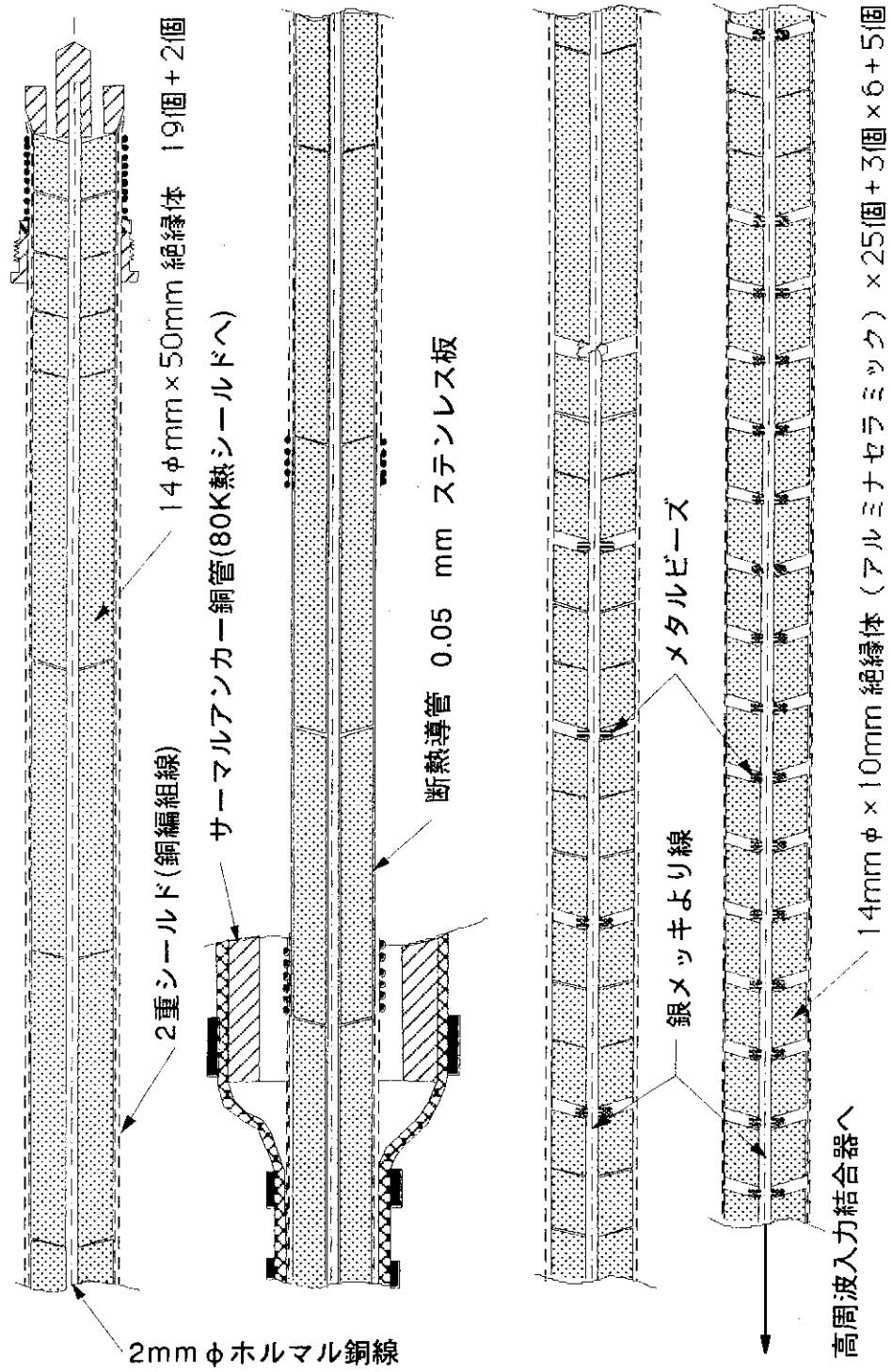


Fig. 2.1.30 高周波電力供給ケーブル



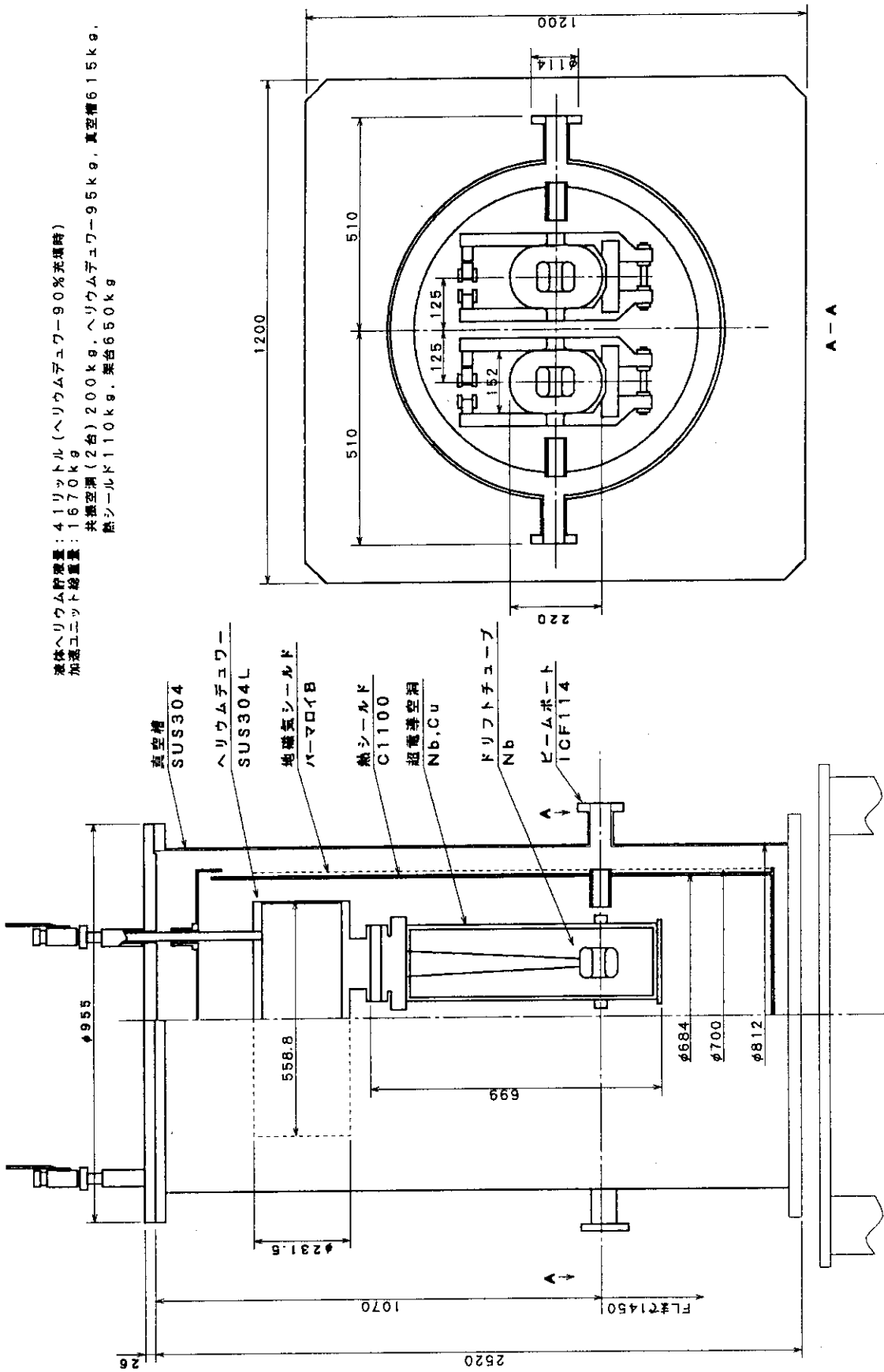


Fig. 2.1.31 デバンチャンナー断面図

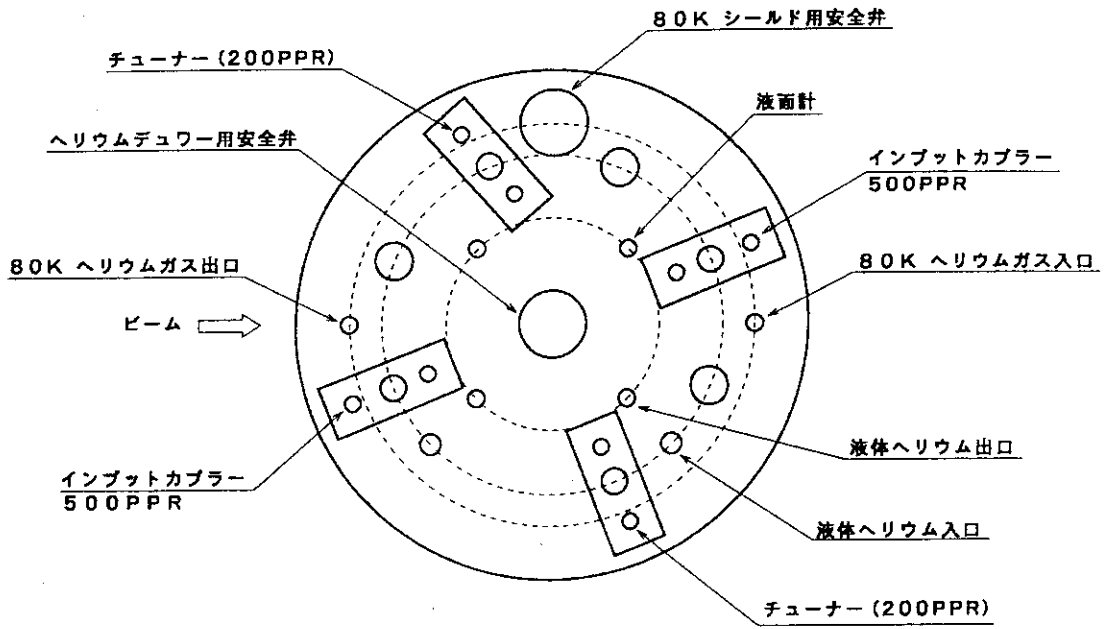


Fig. 2.1.32 デバンチャータ上蓋ポート配置図

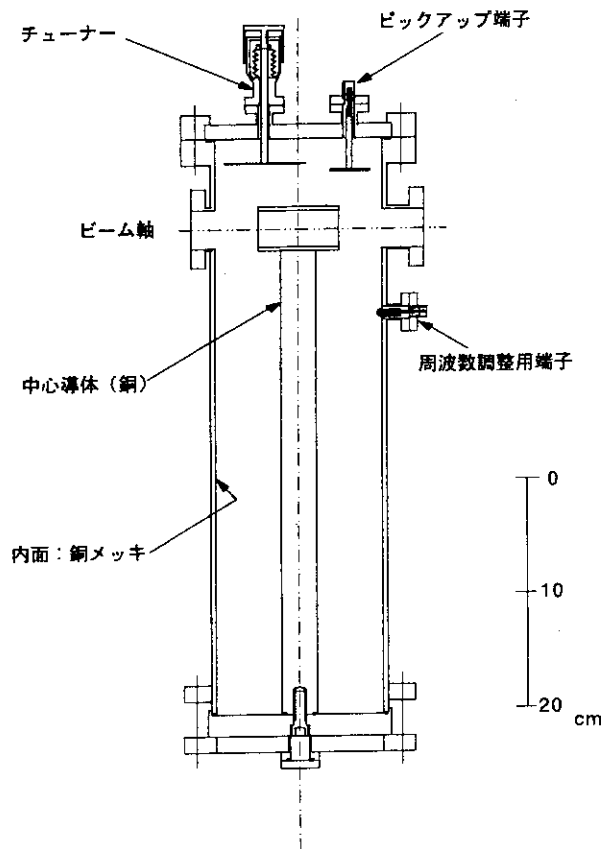


Fig. 2.1.33 ビームバンチ位相検出空洞 ( $\beta_{opt} = 0.10$ ,  $f = 129.8$  MHz)

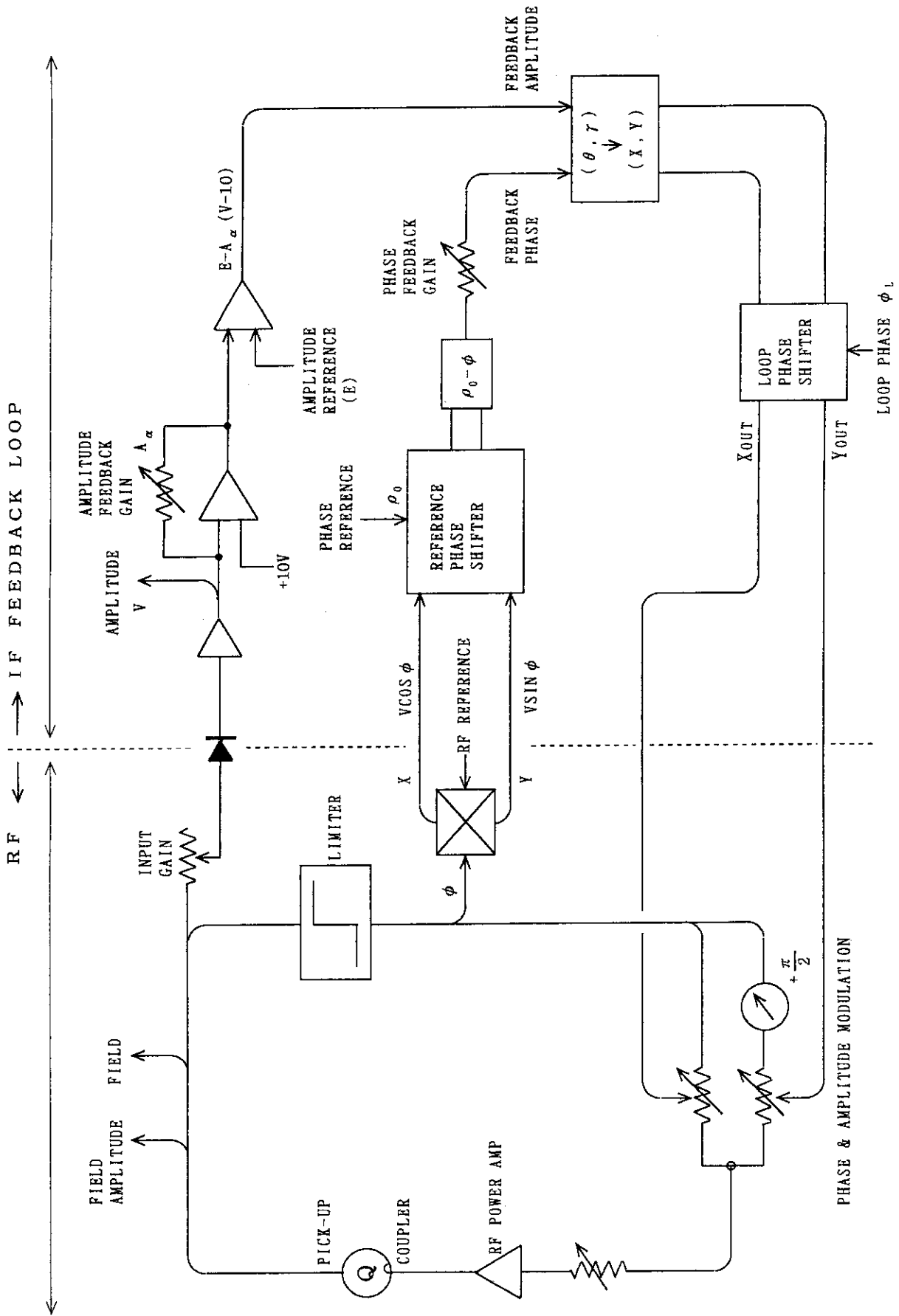


Fig. 2.1.34 空洞制御概念図

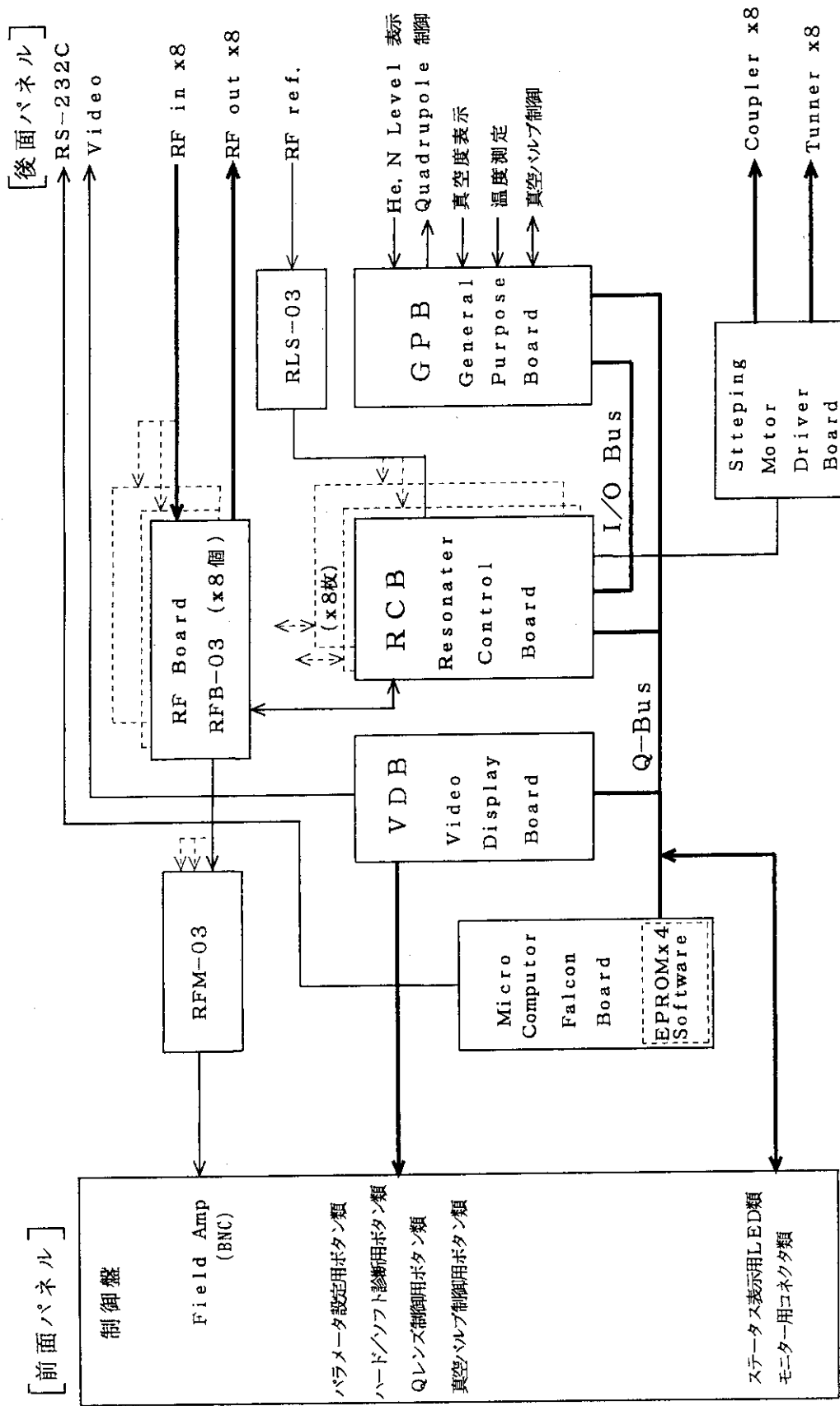


Fig. 2.1.35 制御ユニット構成図

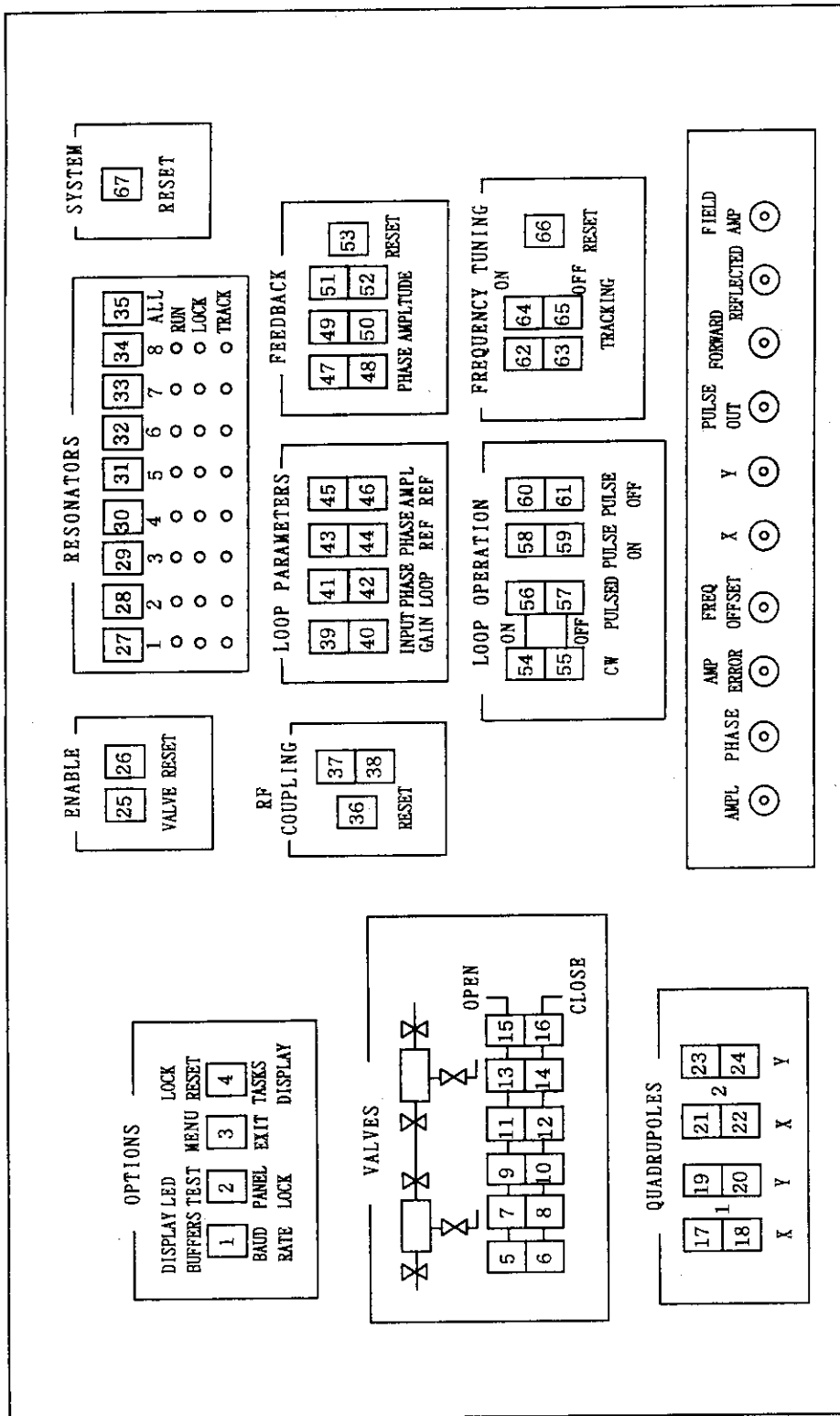


Fig. 2.1.36 制御ユニット制御盤

## 【Fig. 2.1.36 の説明文】

制御ユニット制御盤のスイッチの機能：

- ①OPTIONSスイッチ 1～4は、空洞とクライオスタットの画面切換、LEDの動作テスト、プログラムの診断、スイッチ類のロック、背面パネルのアナログ信号のモニター等のスイッチである。
- ②ENABLEボタン25, 26は、バルブ操作、カップリングとチューニング・モーターのリセットおよびシステムのリセット等重要な操作を行う場合の二重安全確認スイッチである。
- ③RESONATORSスイッチ27～35は、空洞の選択ボタンで制御可能とする。また 8台同時制御のためのスイッチも用意されている。
- ④LOOP PARAMETERSスイッチ39～46は、RF回路の制御パラメータを調整する。
- ⑤LOOP OPERATIONスイッチ54～61は、連続運転／パルス運転の指定およびパルス幅、間隔等を設定する。
- ⑥RF COUPLINGスイッチ36～38は、ENABLEボタン26と連動してカップラーのリセット、カップラーのIN/OUTを加減する。
- ⑦FEEDBACKスイッチ47～53は、フィードバック回路のゲイン、回路のON/OFF等を設定する。
- ⑧FREQUENCY TUNINGスイッチ62～66は、周波数トラッキング動作のON/OFF制御、ENABLEボタン26と連動したチューナーのリセット動作をする。
- ⑨QUADRUPOLESスイッチ17～24は、2台の 4重極電磁石コイルX, Yの設定電圧を加減する。
- ⑩VALVSESスイッチ 5～16は、現在使用していない。
- ⑪SYSTEMスイッチ67はENABLEボタン26と連動してシステム全体のリセットを行う。
- ⑫制御盤下部および背面には他空洞や回路の調整に有益なモニター信号類のBNC端子出力がある。また、背面パネルにはRS232Cポートがあり外部端末からリモート操作できる。

## 2. 2 ヘリウム冷却系

### 2. 2. 1 はじめに

タンデムブースターは超電導を利用した加速器のため冷却には液体ヘリウムを使用している。全熱負荷は 300Wと見積られ余裕を考慮した冷凍能力は 500W必要である。液体ヘリウムは2台の冷凍能力 250Wの冷凍装置により製造し、前段部用としてバンチャーから第5加速ユニットまでのクライオスタットに、後段部用として第6加速ユニットからデバンチャーまでのクライオスタットに供給される。

#### (1) 高圧ガス取締法に係わる適用法令について

ブースターの開発当初はクライオスタット等は一般高圧ガス保安規則で規定されている特定設備としての製造になり材料の段階から厳しい審査を受ける必要があった。冷却系の検討が進みブースターの全体構想が明確にできてきたところで監督官庁と協議を重ねた結果本装置は高圧ガス取締法のうちの冷凍保安則に該当する設備となった。本ヘリウム冷却系は液体ヘリウムを製造する部分のみが冷凍設備ではなく、クライオスタットを含めた施設全体が冷凍設備に該当する。ヘリウム冷凍機の場合冷凍能力の 1,000倍以上の一次電力を要するため非常に大型の圧縮機と液化器が必要となり、高圧ガス取締法冷凍保安規則の規定するところの第一種冷凍保安責任者の資格を所持する責任者を配置する必要が生ずる。第一種冷凍保安責任者の資格は非常に高度な冷凍に関する知識と共に 100冷凍トン以上の製造施設の従事経験を要するが、原研にはその施設がないためすぐには運転が不可能なことから、もう一段規制のゆるい第二種冷凍保安責任者免状で運転可能な施設の範囲に入る容量の施設となるよう設備を二分割した。第二種冷凍保安責任者免状で運転可能な冷凍施設は一日の処理能力が 300冷凍トンまでの施設であるが、圧縮機の使用電力にして 360kWの電力までその範囲に入る。本ヘリウム冷却系は冷凍機の範ちゅうに入る装置のため液体ヘリウムの取り出しは不可能な構造になっている。また法令上ヘリウム冷凍機は冷凍保安規則のなかに規定がないものであるが日常点検記録、運転記録、及び一年に一度の定期自主検査を行い記録を保管するようにしている。

#### (2) 構成

ヘリウム冷却系（冷凍機）は以下のものにより構成される。

- (1) ヘリウム液化器
- (2) ヘリウム圧縮機
- (3) 低温配管、移送配管
- (4) 補助機器
- (5) 冷凍機制御装置

### (3) 機種選定について

ヘリウム冷凍機のうち液化器は非常に精密な装置を持つ。この液化部分がヘリウム冷凍機の心臓部であり冷凍機の難しさを象徴している。ヘリウム冷凍機の場合、圧縮された常温のガスを冷却する段階で膨張エンジンを用い温度を下げながら運転する必要がある。現在の膨張エンジンは高速で回転するタービン膨張機が主でこの装置のノウハウが冷凍装置の性能を決定すると言っても過言ではないほど重要な装置となっている。現在日本国内で使用されているタービン膨張機のメーカーは数社ほどである。輸入されている膨張機のメーカーは元スイスのメーカーで現在はドイツのリンデ社に吸収されたスルーザー社とフランスのエアーリキッド社等である。いずれのメーカーの製品も日本の代理店により輸入され多くの冷凍機に使用されている。とくに前者のスルーザー社の製品はガスを冷却、加熱するための熱交換器が小型でありヘリウムの液化部の大きさが小型に出来る利点から多くの企業、大学、研究所などに設置されている。本報告書の装置も各所の冷凍機を調査した結果をもとに前者のスルーザー社の装置となった。

## 2. 2. 2 ヘリウム液化器 (コールドボックス)

ヘリウム液化器は圧縮ガスを循環しながら膨張タービンを使用し冷却し最終段では液体ヘリウムを得る装置である。ブースターに使用されている液化器は二つの温度範囲の要求からガスの温度が定常状態で 80Kになる熱交換機の部分からその一部を取りだし、クライオスタット内部の熱シールドを冷却後膨張タービンを經由する系統を設けている。またさらに冷却を進め液体を作り加速空洞に供給する系統が組み合わされている。加速空洞から戻ってきたヘリウムの湿り蒸気はJT弁を通ってきたガスと一緒に液化装置内の液溜めに送られ、液体と気体分が分離される。コールドボックスの外部には種々の制御バルブ等が取付けられ制御プログラムに従い制御されている。膨張タービンは2基取付けられ、2段の冷却を行っている。また内部には大きな熱交換器があり送られてくるガスは冷却を、戻って行くガスは加熱されるようになっている。コールドボックスの性能仕様をTable 2.2.1 に、ガスのながれをFig. 2.2.1 に示す。

## 2. 2. 3 ヘリウム圧縮機

ヘリウム圧縮機はオイルフリーのガスを作り出すためとくに大型のフィルターを備え、ガス中に不純物を混入させない構造を備えている。圧縮機本体および動力用モーターは国産のメーカーの前川製作所および三菱電機(株)製である。ガスの圧縮部分はスクリュウ式であり、圧縮ガスと同時に良く脱気した専用のオイルを使用し、ガス圧より  $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 程高い圧力で噴射させている。スクリュウとスクリュウおよびケーシングとの間隙はこの循環させているオイルにより圧縮機能を持たせている。当然のことながら圧縮直後のヘリウムガスには大量のオイルミストを含んでいることになる。オイル分と共に導かれたガスは、オイルセパレーターにて大半のオイルとガスに分離される。ガスはこの後冷却され6段のフィルターを經由する事により、オ



イル分と不純物をほとんど含まないガスとなる。圧縮機の仕様をTable 2.2.2 に、ヘリウム圧縮機のフロー図を Fig.2.2.2 に示す。

Table 2.2.1 コールドボックスの主な性能

形式	リンデ社製 TCF-50 型	
冷凍能力 (液体窒素を使用しない)	250 W	(液体ヘリウム負荷)
	1,500 W	(80Kガス負荷)
液化能力 (液体窒素を使用しない)	35 l/s	
ヘリウムガス条件	流量	5.3 g/s
	供給圧力	14.4 bar
	供給温度	313 K
	戻り圧力	1.05 bar
	戻り温度	307 K
	含有油分	0.01 vol. ppm
	ガス純度	99.995 vol. %
	使用タービン膨張機	TGL 16-16S/S-A28A2 型、TGL 22-18L/L-A36A2 型

Table 2.2.2 ヘリウム圧縮機の仕様

型式	前川製作所	HE2520MSC 型
回転数		2,995 rpm
使用電動機	三菱電機製	SB-LH 型 310 kW 2P
吐出圧力		12.8 kg/cm <sup>2</sup> G
中間圧力		2.5 kg/cm <sup>2</sup> G
吸入圧力		0.03 kg/cm <sup>2</sup> G
ガス風量		1.850 m <sup>3</sup> /h
フィルター類		
オイルセパレーター		1 台
オイルフィルター		2 台 4 段
活性炭フィルター		1 台
モレキュラーシーブフィルター		1 台
インタークーラー		2 台
オイルポンプ		1 台
その他		
フィルター再生用加熱器		1 台

## 2. 2. 4 低温配管、移送配管

ヘリウム液化装置からクライオスタットに液体ヘリウムおよび冷却された低温のガスを供給するため、低温配管をFig. 2. 2. 3 に示すごとく設置してある。低温配管の途中には各クライオスタットに均等にガスおよび液体ヘリウムを供給するため流量調整バルブを設けてある。分岐点はバルブを設けるため配管が複雑化しており、クライオスタット2基または3基を基準に箱形構造となっている。

低温配管の内部は2重構造となり液体ヘリウムを送る配管は一番内側に位置している。80Kの配管を含めすべて内部構造体の外側にスーパーインシュレーター（20層）を巻き輻射による熱侵入を押さえる構造としてある。各クライオスタットに液体ヘリウムおよび80Kの低温ガスを供給する移送配管も同様の構造であるが、一方向の流れ用のため単純な2重構造となっている。低温配管および移送配管は真空断熱構造のため内部は常時200 l/sの真空ポンプで真空を保っている。常時真空に引くことにより真空悪化による結露を防いでいる。

液化機から送り出されたヘリウムは大口径の移送配管を通り低温配管に接続されている。低温配管に入ったところには低温流量計があり、液化装置の性能測定や冷却を効率的に行うために使用されている。

低温配管にはヘリウムを分配するため分配弁が設置されている。液体用には遠隔制御弁を使用している。これにより自由に冷却速度を制御することができるほか、負荷が増えたときなど液面を観察しながら制御が可能である。ただし、現在低温配管に取り付けられている分配弁は使用範囲が10%前後であり非常に敏感なことから、バルブのCV値（バルブのコンダクタンスであり現在のものは0.64で直線性の特性のもの）を低くし急激な流量変化のない特性のバルブに交換する予定である。80Kの低温ガスの分配は固定開度で良いためマニュアルバルブとしてあり通常運転では動かすことはない。

低温配管の入り口部にはクライオスタットを過剰な圧力から守るため電磁放出弁を設けてある。予測外の冷凍装置の停止にはこれにより一定圧力以上にならないよう減圧できるようになっている。Table 2. 2. 3 に使用構成部品を記す。

Table 2. 2. 3 低温配管の主な構成要素

分岐バルブ	自動弁	スイス Weka 社製	P-TEV DN10/PN25C-Ps 型
	手動弁	Weka 社製	H-TEV DN10/PN25C-m. prec. 型
分岐バルブ用制御指示器		(株)チノー製	DB-1130-000 型
真空ポンプ		(株)セイコー精機製	STP-H200 型
低温流量計用手動弁		スイス Weka 社製	H-TEV DN10/PN25C-m. prec. 型
差圧発信器		(株)長野計器製作所製	KH62 型
差圧表示器		(株)チノー製	DB-1130-000 型

## 2. 2. 5 補助機器

ヘリウム冷凍装置を運転するためには種々の補助的な装置を要する。以下に各機器の性能および概略を記す。

### (1) 圧縮空気設備

圧縮空気は液体ヘリウム用分配弁およびコールドボックスに使用されている極低温バルブの制御に使用されている。このバルブは内蔵されているスプリングと空気圧のバランス状態で使用されるため常時圧力を逃がす形式となっている。空気圧縮部は2基の圧縮機を備え交互運転し信頼性を高めている。また乾燥機を備え水分を極力抑えた装置となっている。Table 2.2.4 に使用している圧縮空気設備の性能を記す。

Table 2.2.4 圧縮空気設備の性能

空気圧縮機 ( (株) 日立製作所製 形式 5.5KWOP-8.5T50Hz 型)	
消費電力	5.5 kW 1段
最高使用圧力	8.5 kg/cm <sup>2</sup>
吐出空気量	600 l/min
空気タンク	170 l
乾燥機 (オリオン株式会社製 形式 RAX-8SE 型)	
空気処理量	1.1 m <sup>3</sup> /min
消費電力	0.4 kW
フィルター (オリオン株式会社製 形式 OLF-150-B 型)	
処理能力	1.0 Nm <sup>3</sup> /min

### (2) 冷却水設備

冷却水はヘリウム圧縮機用熱交換器およびヘリウム液化機に使用される。大部分の冷却水は圧縮機の熱交換器で圧縮されたガスと潤滑用オイルの冷却に使用される。液化機では膨張タービンの冷却および真空ポンプに使用される。温度上昇した冷却水は密閉式の冷却塔に導かれ、大気解放になっている冷却水をシャワー状に散布しながらファンにより冷却される。いずれの冷却水にも水処理剤を投入し防錆効果等を得ている。特に大気解放となっている2次冷却水にはカルシウム分の析出を防ぐ処理を行っているが効果は充分ではなく、投薬試験を継続している。冷却塔は同じ性能のもの2基を並べて設置している。2台のヘリウム圧縮機の運転に対し気温の低い時期には1基で足りることもあるが気温の高い時期は2基を必要とするので、常に2基の冷却塔を使用している。Table 2.2.5 に冷却水装置の性能を記す。

Table 2.2.5 冷却水装置の性能

冷却塔	(セイコー加工機株式会社製 SCS-150A 型)	
冷却能力	550,000 kcal/h	
冷却水量	110 m <sup>3</sup> /h	
入口水温	37 °C	
出口水温	32 °C	
送風機	1,200 φ 5.5KW アルミニウム鋳物製	
散水ポンプ	1.5 kW	
循環ポンプ	(三菱 SKF-150I 型) 18.5 kW 1400rpm	
循環量	1.9 m <sup>3</sup> /min	
揚程	30 m	

### (3) ガス純度計 (ガスクロマトグラフ)

本冷却系ではヘリウムガス中の窒素、酸素成分を測定するため熱伝導タイプ検出器を備えたガス純度計 (島津製作所製GC-8APTガスクロマトグラフ/C-R8Aクロマトパック、10倍増幅器付) を設置した。この純度計は 1ppm程度の微量の不純物の分析ができるよう高感度増幅器を備えたものであり、検出器を組み込んだ恒温槽、データーを処理するための装置およびガスマニホールドから構成されている。微量の検出を正確に行うため装置の安定化に時間を要する。原理は純ガスと不純物を含んだガスの熱伝導度の違いを検出するものあり、超高純度のヘリウムガスを基準ガスとして使用する。検出感度は窒素、酸素共1ppm以下である。測定結果の一例をFig. 2.2.4 に示す。

ヘリウム液化器にとってガス中の不純物は故障の原因となる。本液化器は窒素成分等の不純物の総量が 50ppm以下で使用するよう指示されている。冷却系の運転前には必ず各部のガスを測定し純度管理を行っている。この純度計の他にも系内に純度計があり、冷却開始前に系全体のガスを循環し濃度を測定している。これは通常停止時には測定ができない。

### (4) 真空排気装置

低温配管用の真空ポンプとして 200 l/sの磁気浮上型排気装置を用いている。磁気浮上型のポンプは特に振動が少なく、他の装置に影響を与えないので最適である。また、オイルを使用していないため油脂分による真空装置の汚染を最小にしている。ロータリーポンプとの間にもフォアライントラップを設けオイル分の逆流を防いでいる。真空ポンプの構成をTable 2.2.6 に示す。

Table 2.2.6 真空排気装置の構成

ターボモレキュラーポンプ	セイコー精機製	STPH200G 型 ICF152フランジ付き
ロータリーポンプ	エドワーズ社製	E2M18 型
バルブ類	ゲートバルブ	V A T社製 14046-CE44 型
	逆流防止弁	エドワーズ社製 PV25EK 型
	リークバルブ	C K D社製 AB42-02-2-AC200V型
フォアライントラップ	エドワーズ社製	FL20K 型
オイルミストフィルター	エドワーズ社製	EMF20 型

## 2. 2. 6 冷凍機制御装置

### (1) 制御装置

冷凍機制御装置はスルザー社製の多くの冷凍機に使用されている制御装置、通称サトコン（スウェーデン、SattControl社製、31-10型）、を使用している。サトコンはモジュール型計算機を基にメモリー、アナログI/O、デジタルI/O等のモジュールを任意に組み合わせ制御装置を構築することができる装置であり、ほとんど全ての構成機器の運転操作を冷凍機操作制御卓からサトコンを通し行えるようにプログラムされている。制御装置の側には端末装置を配置し冷凍装置全体の制御を一括して行えるようになっている。制御関係の交流電源には無停電電源装置を導入し、瞬間的な電圧降下にも安定な運転を可能にしている。冷凍機に使用されている機器はTable 2.2.7 のとおりである。

Table 2.2.7 冷凍機制御装置構成

形式	SattCon 31-10型			
システムバージョン	4.1 rev0			
CPU	CU31-1D/CU33			
入出力モジュール	IDPG24	32Bit	1枚	使用ch数 24
	ODPG2	16Bit	2枚	24
	ICA420	8Bit	5枚	32
	OCAH	4Bit	5枚	18
制御端末	VISALINK	/RS232C		
プリンター	シチズン	HQP-40	/RS232C	
無停電電源	富士電機（株）製	M-UPS 10000VSZ 10KVA		

## (2) 冷凍機制御プログラム

制御用のプログラムはシステムプログラムおよび各冷凍機固有の制御プログラム (PBS) が供給されている。システムプログラムはサトコンを管理制御するためのものであり計算機内部の読出し専用メモリーに記入されている。PBSプログラムはシステムプログラムの内部にあり、後述する運転モードにより固有の制御が出来るようになっている。冷凍機の運転に必要な制御パラメーターは端末装置に表示され、予め決められているコマンドをキーボードから打ち込むことにより表示される。冷凍機の制御に必要なパラメーターの変更はディスプレイ 2 にありキーボードにより選択し実行することができる。変更値はサトコンの電源を切ることにより一部のものは初期状態に戻ってしまうので注意を要する。恒久的に変更する必要がある場合には、プログラム内のアsembler言語で書かれた部分を変更する必要がある。制御用端末装置に表示できる項目は、1) 各機器の運転状態、2) 運転制御パラメーター、3) 各種警告等の3種類の表示に分けられる。Table 2.2.8 に代表的な制御パラメーターの表示画面の一例を示す。

Table 2.2.8 ディスプレー 2 運転制御パラメーター

(運転時表示される画面の一例であり数値等は実際の運転状態ではない。)

0	PIC300	AUTO	0.04 kg/cm <sup>2</sup>	0.04 kg/cm <sup>2</sup>	0.0 %
1	PIC301	AUTO	0.0 kg/cm <sup>2</sup>	0.0 kg/cm <sup>2</sup>	50.0 %
2	HIC201	AUTO		0.0 %	0.0 %
3	PDIC107	AUTO	0.70 bar	2.22 bar	0.0 %
4	PIC110	AUTO	12.8 bar	16.0 bar	0.0 %
5	SIC111	AUTO	6000 rps	6000 rps	51.0 %
6	SIC121	AUTO	4000 rps	4000 rps	31.0 %
7	TIC140	AUTO	12.0 K	50.9 K	0.0 %
8	HIC152	AUTO			10.0 %
9	PIC150	AUTO	6.6 bar	6.6 bar	0.0 %
10	PIC171	AUTO	3.0 bar	16.0 bar	0.0 %
11	PIC172	AUTO	2.80 bar	3.07 bar	0.0 %
12	HIC173	AUTO			0.0 %
13	HIC179	AUTO			0.0 %
14	HIC109	AUTO			0.0 %
15	LIC160	AUTO	65.0 %	12.5 %	0 %
16	TIC172	AUTO	4.0 K	336.2 K	0.0 %

## (3) 冷凍機の運転およびフローチャート

キーボードから入力された命令により冷凍機は各種の運転を開始する。運転モードは7種に分けられそのうち冷却運転に4種、液体回収および暖機運転に3種あり、必要に応じそれらを

組み合わせ運転を行うようになっている。運転前にはあらかじめ各機器内ガスの純度、圧力、真空度、バルブの状態等すべての機器を定められた基準値および状態にしておく必要がある。Fig. 2.2.5aに標準的な運転手順を示す。ヘリウム冷凍機特有の膨張タービンは繊細な動作特性の装置のため、制御系の状態変化により急に停止してしまう場合（破損を防止するためインターロックにより強制的に停止させられる）がある。このような場合の再冷却手順をFig. 2.2.5bに、故障等によりヘリウム圧縮機がトリップした場合の再冷却手順をFig. 2.2.5cに示す。また、定常状態に於ける冷凍機全体のガスの流れをFig. 2.2.6に示す。

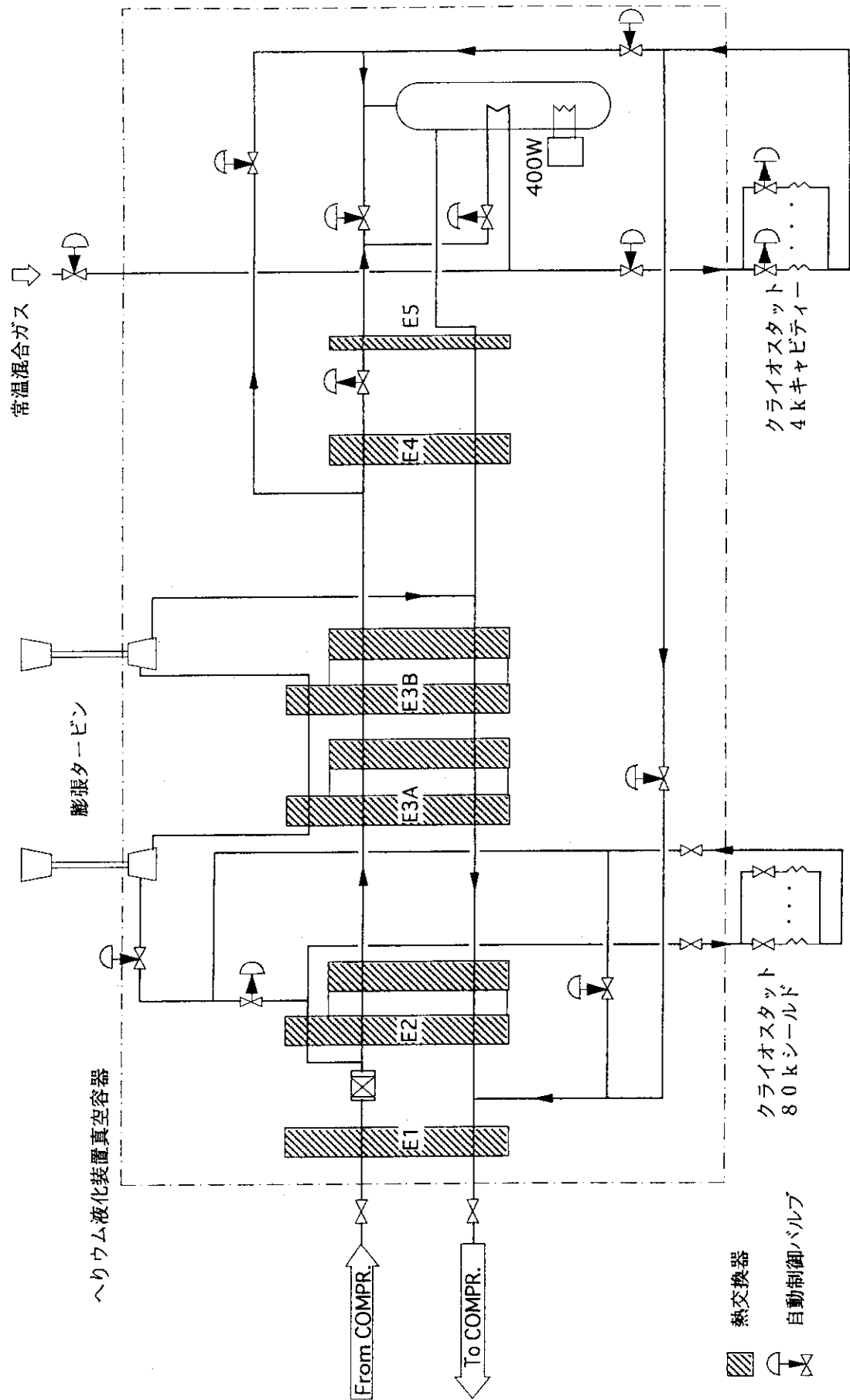


Fig. 2.2.1 ヘリウム液化装置内部フロー



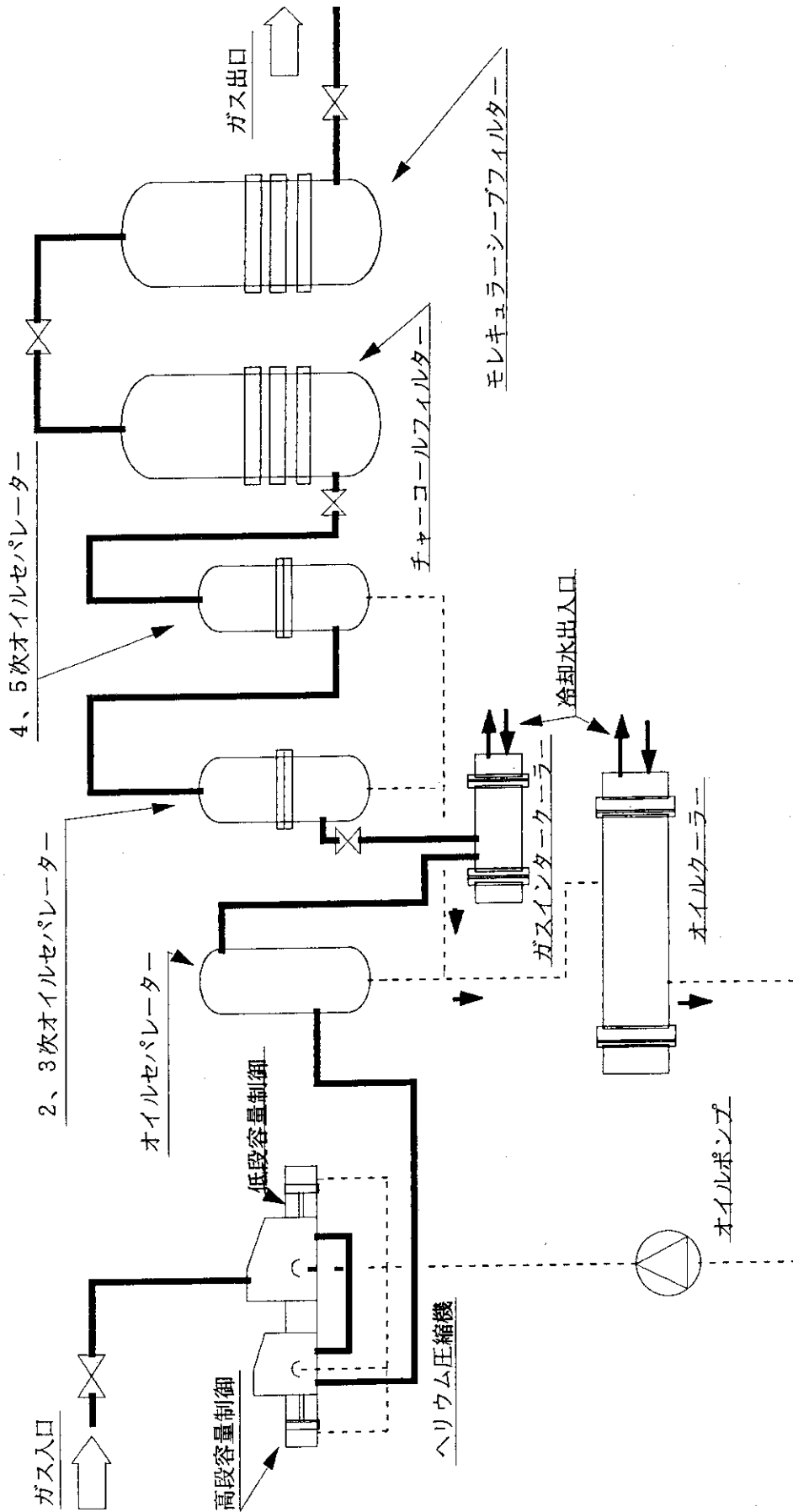


Fig. 2.2.2 ヘリウム圧縮機内ヘリウムガスおよびシール用オイルの流れ

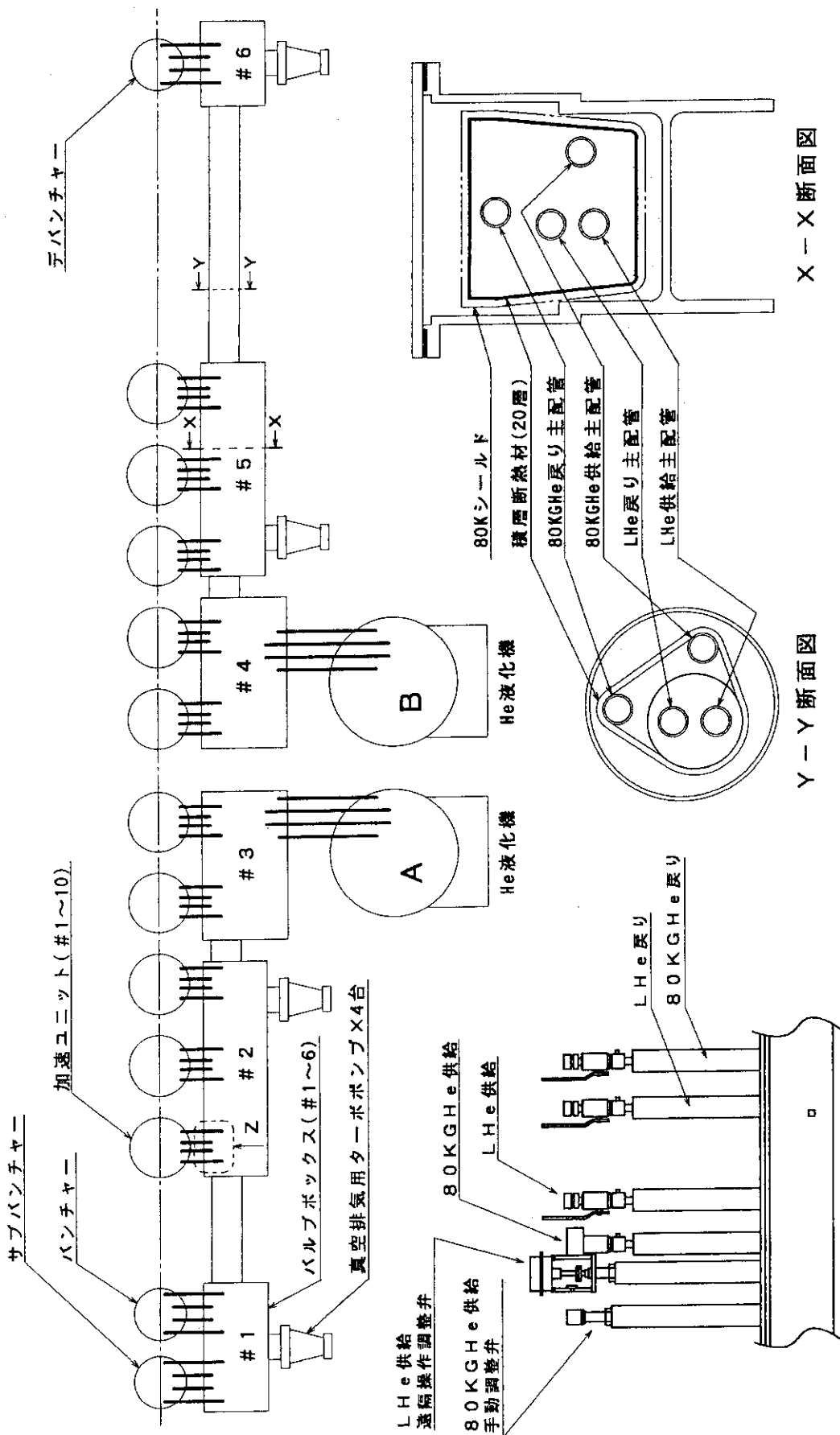
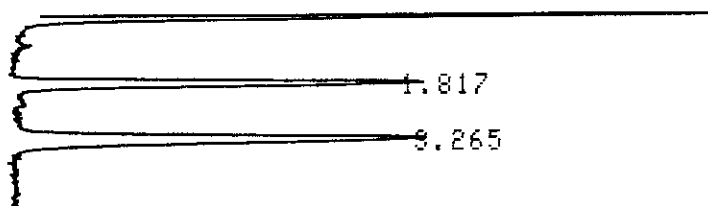


Fig. 2.2.3 ヘリウム低温配管図

START  
95/01/23

14:13:18



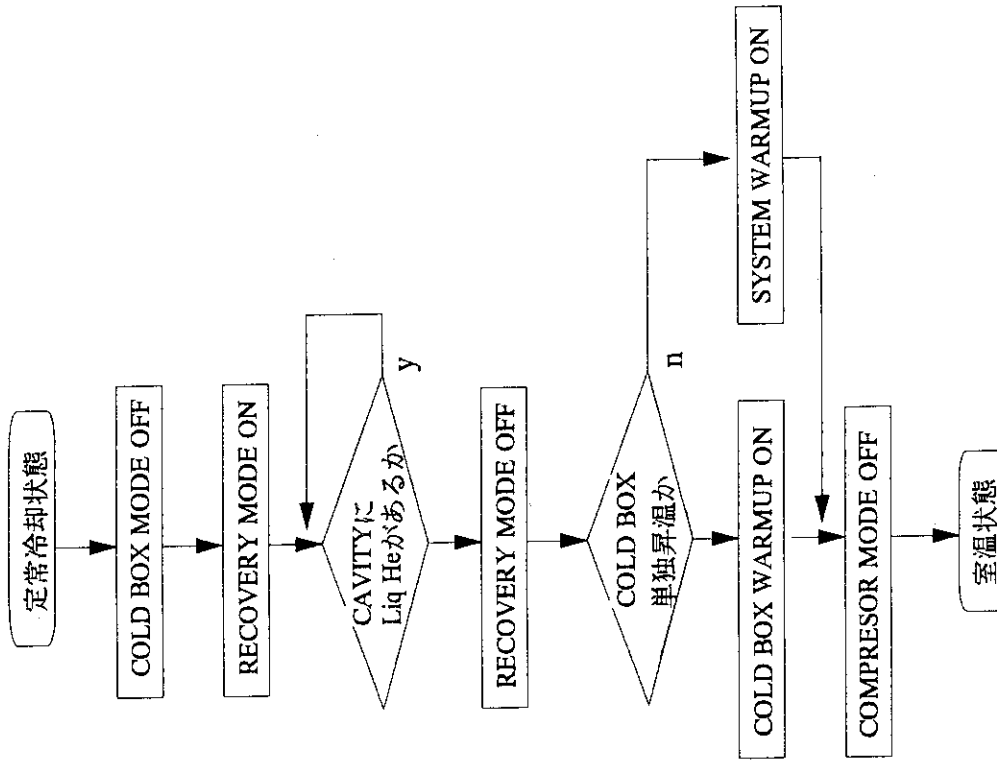
CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 470

FILE 2  
METHOD 44  
SAMPLE WT 100

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.817	4228		1	9.6926	O2
2	3.265	5468		2	9.5321	N2
TOTAL		9696			19.2247	

Fig. 2.2.4 ヘリウムガスの純度測定例 (標準ガス)

2. 定常冷却から昇温する場合



1. 通常の冷却に於ける運転手順

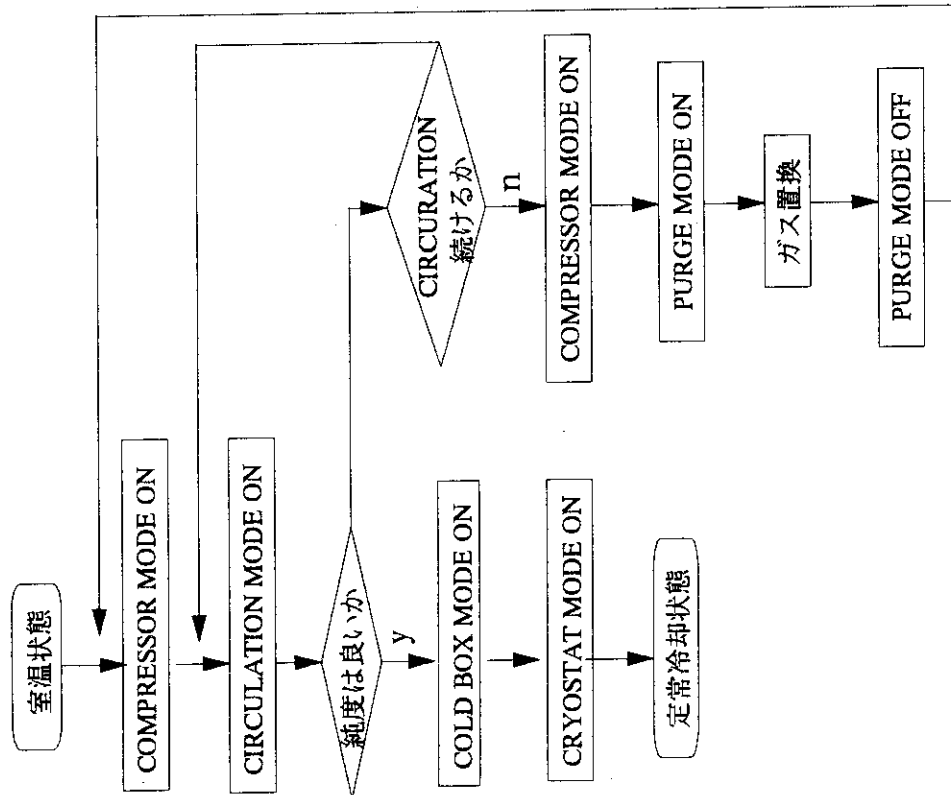
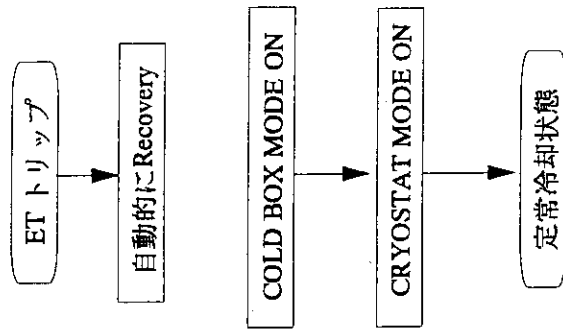


Fig. 2.2.5a ヘリウム冷凍装置の運転手順 1

4. ETトリップ (予冷中) から再冷却



3. ETトリップ (定常冷却) から再冷却

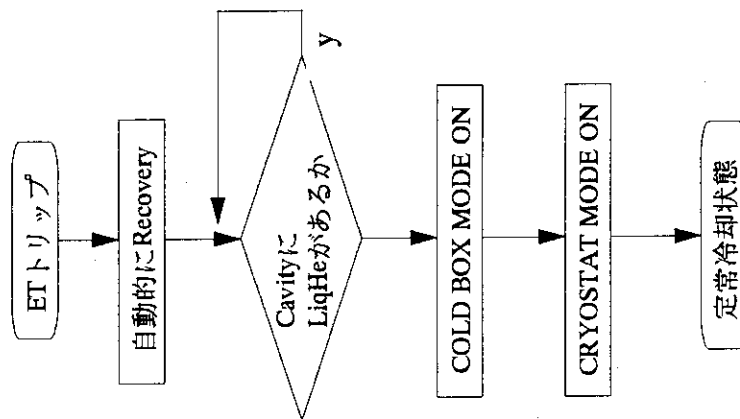
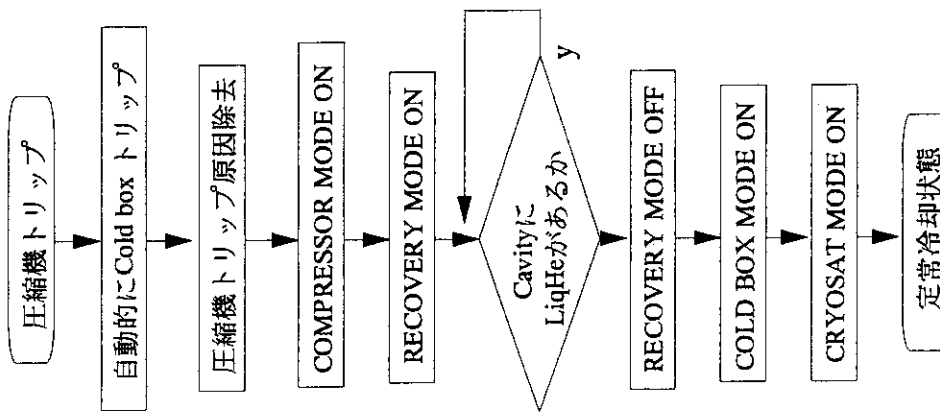


Fig. 2.2.5b ヘリウム冷凍装置の運転手順2

5. 圧縮機トリップ (定常冷却) から再冷却



6. 圧縮機トリップ (予冷中) から再冷却

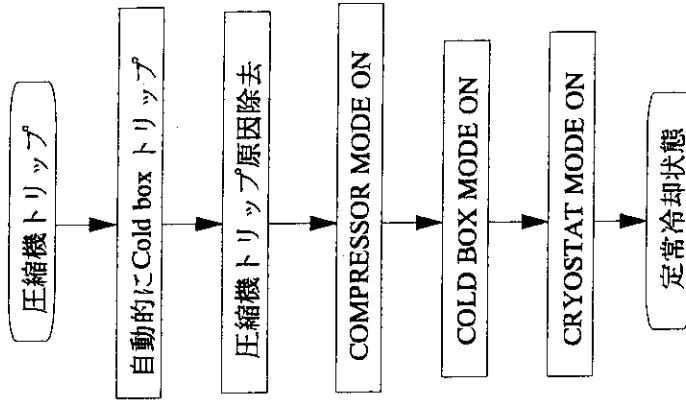


Fig. 2.2.5c ヘリウム冷凍装置の運転手順3

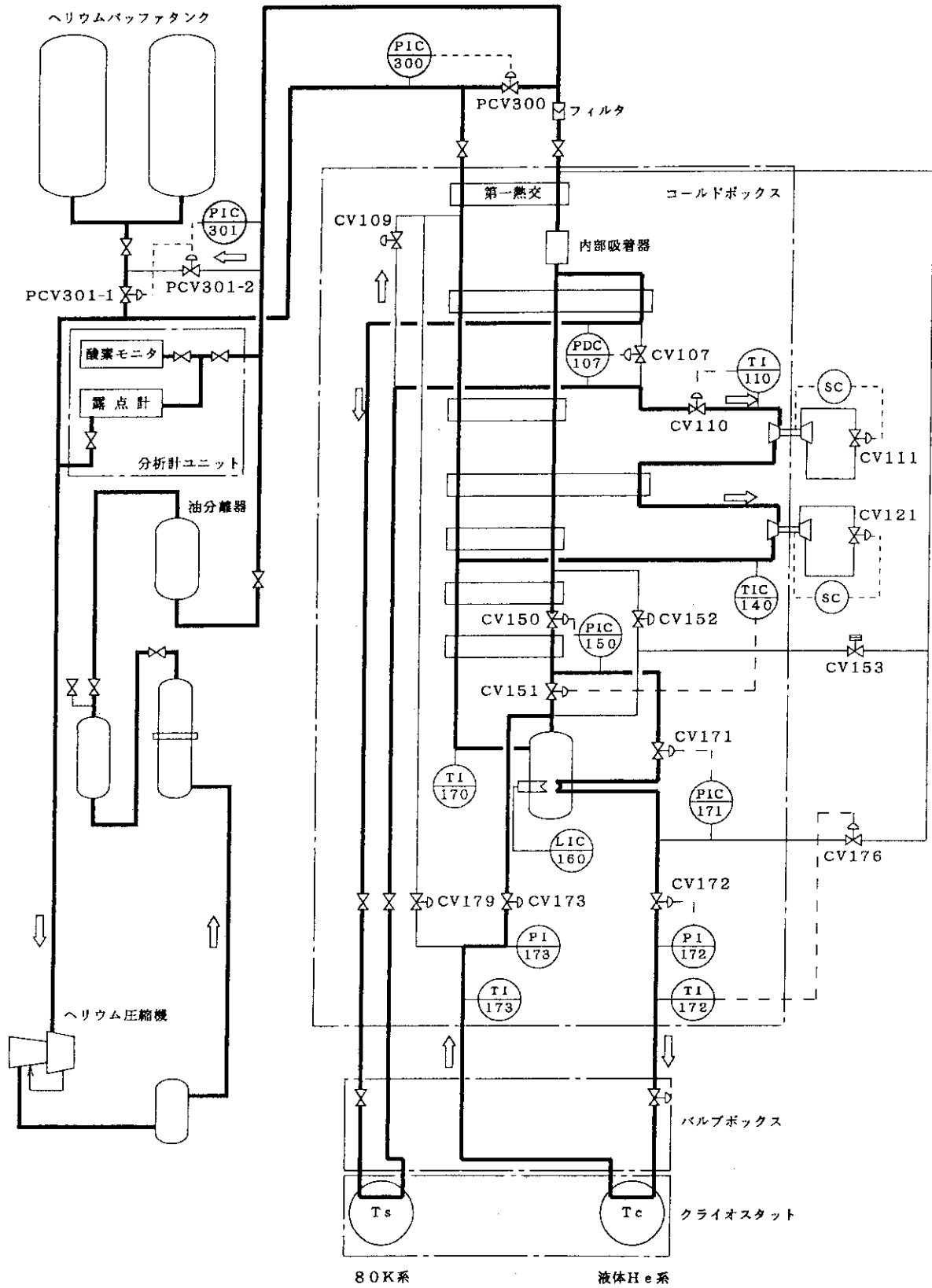


Fig. 2.2.6 定常状態に於けるガスの流れ

## 2. 3 ビームライン

### 2. 3. 1 はじめに

タンデム加速器で加速された重イオンビームは振分電磁石を通過し、その直線コースの延長線上に設置されているブースターで再加速される。ブースターで再加速された重イオンビームは、直線加速器建家ブースター室にある分析電磁石で90度偏向後ブースターターゲット室へ導かれ、ターゲット・ビームライン用振分電磁石（出口3ポート）で各ターゲットビームラインへ到達する。

ビームライン系の設計にあたっては、タンデム加速器の設計概念と同様にイオンビーム光学（別項2. 1. 4）参照のこと）を基本に電磁石、Qレンズならびにファラデーカップなどの機器の配置を決定し、よりビームトランスポートを良くするために任意の箇所に電磁ステアラを配置しその効果を上げている。

ビームライン系の制御（主にビームハンドリング系機器）は、一部を除きタンデム加速器制御系と同様にタンデム加速器制御コンソールからCAMAC系を介してデジタル制御できるようになっている。このビームライン制御系については2. 3. 6）を参照のこと。

ブースターに関する主要な機器の配置をFig. 2. 3. 1、バンチャー入口からブースターターゲット室までのビームハンドリング系機器の配置をFig. 2. 3. 2、同様にビームライン真空系機器の配置をFig. 2. 3. 3に示し、設置エリアごとの外観図をFig. 2. 3. 4に示す。

### 2. 3. 2 ビームハンドリング系

使用している機器は一部を除き米国ナショナルエレクトロスタティックス社（NEC）製を使用し、タンデム加速器で使用している機器との互換性を図っている。

ビームラインの高さはタンデム加速器側と同様に床面から真空ダクト中心までを1.45mに配置している。ビームライン上に配置される各種機器をサポートするための架台も新たに設置し、機器制御盤および電源の設置や配線作業を容易にするための工夫もなされている。架台上には機器を固定するための円形サポーターがあり、上下左右方向ともに各±2cmの調整ができる。また重量物のQレンズ（3連4重極電磁石および2連4重極電磁石）、電磁石およびイオンポンプ本体のサポートはビームライン架台とは独立した専用の架台を使用しそれぞれで位置調整できるようにしている。

イオンビーム光学に従い分析電磁石、振分電磁石、3連4重極電磁石などを通過したイオンビームの収束点にはイオンビーム強度をモニターするための機器（ビームプロファイルモニター、ファラデーカップ）を設置している。



振分電磁石で各ターゲットビームラインへ振り分けられたイオンビームは、実験ターゲットに到達するように電磁ステアラー（X軸Y軸両用）、3連4重極電磁石、ビームプロファイルモニターおよびファラデーカップをそれぞれに設置している。ターゲット・ビームライン用3連4重極電磁石には今までより磁場勾配の強いものを使用しており、実験用ターゲットで円形ウエストを作り最大のビーム強度を得られるように配置している。

ビームハンドリング系を構成する主な機器類（ターゲット・ビームラインも含む）を以下に示す。機器仕様についてはそれぞれの完成図書および取り扱い説明書を参照されたい。

なお電磁石関係の概略仕様については同項4)に記す。

使用機器	機器記号	台数
ビームプロファイルモニター	BPM	9台
ファラディカップ	FC	8台
ダブルスリット	DS	2台
3連4重極電磁石	MQ	5台
2連4重極電磁石	MQ	9台
電磁ステアラー（X/Y両用）	MS	7台
電磁ステアラー（X軸専用）	MSX	1台
電磁ステアラー（Y軸専用）	MSY	2台
分析電磁石(90度)	BM	1台
振分電磁石(50度)	BM	1台

### 2. 3. 3 ビームライン真空系

タンデム加速器のビームライン真空系と同様にビームラインの真空ダクトには4インチ・ステンレススチール管を使用し、管内は $1 \times 10^{-6}$  Pa以下の高真空を保つように設計しており、セクションごとにイオンポンプ（200 l/s）、イオンゲージ、イオンゲージ・コントローラおよび全金属製真空バルブ（ビームラインバルブ）を設けており、各セクションの真空度はイオンゲージ・コントローラを介して制御コンソールで読みとることができる。

ビームラインバルブには2系統のインターロックを併設している。一方はあるセクション内の真空が何らかの理由で悪化した場合その箇所を仕切る働きと、他方はバルブが閉まっている状態でファラデーカップを開けようとした場合に、イオンビームがその下流にあるバルブシートに当たって焼損をおこさないようにするためである。

各セクションに配置しているビームラインバルブはハードワイヤで接続されており制御コンソール上の真空系表示盤のスイッチによって開閉操作ができるようになっているが、加速ユニット間はビームラインの長さが短いためビームラインバルブは取り付けられないので、この間には手動式のゲートバルブを設けている。

ブースターターゲット室の振分電磁石入口近くにはターゲット・ビームライン側で真空トラブルが起きた場合、ブースターへの損害を最小限に食い止めるために高速で動作するファース

トアクティング・バルブを設置している。これは圧力センサーによって真空を監視しており、真空が悪化した場合は強力なスプリングの力によって瞬時に閉じるようになっている。

真空内では水分を極端に嫌うため各セクションには真空を破るための窒素ガス封入用バルブ（1インチ・アングルバルブ）を設け、そこにICFフランジを使用したポートを付け荒引き用ターボポンプを取り付けることができるようにしてビームライン系の保守を容易にしている。

真空接合部は主にNEC社標準規格の4インチパイプ用6インチODフランジを使用しており、真空ガasketにはアルミニウム線を使用するため高真空を維持するのに有効である。なお真空ゲージ用ポートおよびファーストアクティング・バルブ圧力センサー用ポートはICFフランジ（銅ガasket）を使用している。

ターゲット・ビームラインの構成も同様で3本のビームライン毎にイオンポンプ排気系1式（イオンポンプ、イオンゲージおよびイオンゲージ・コントローラ）およびビームラインバルブを振分電磁石出口直後と実験装置入口付近にそれぞれ1個配置している。

ビームライン真空系を構成する主な機器類を以下に示す。機器仕様についてはそれぞれの完成図書および取り扱い説明書を参照されたい。

使用機器	機器記号	排気速度(1/s)	数
イオンポンプ	IP	200	9台
ビームラインバルブ	BLV	—	12個
ファーストアクティング・バルブ	FAV	—	1個
ゲートバルブ(加速ユニット間)	GV	—	9台
イオンゲージ・コントローラ	IGC	—	7式
バンチャー用ターボポンプ	TMP	1,000	1台
サブバンチャー用ターボポンプ	TMP	1,000	1台
加速ユニット用ターボポンプ	TMP	1,000	10台
デバンチャー用ターボポンプ	TMP	1,000	1台

## 2. 3. 4 電磁石機器

電磁石機器類の設計概念および仕様について以下に記す。詳細な仕様についてはそれぞれの完成図書および取り扱い説明書を参照されたい。

### (1) 分析電磁石

分析電磁石の大きさは超電導ブースターによって加速されるイオンのMass-Energy Productを計算しその結果に基づいて計算される。ここで計算するイオンの種類は $^{12}\text{C}$ 、 $^{35}\text{Cl}$ 、 $^{127}\text{I}$ 、 $^{197}\text{Au}$ を想定し、タンデム加速器ターミナル電圧を17MVと設定した上で使用するストリッパーの組み合わせを変えて計算する。

1次ストリッパー（カーボンフォイルまたは窒素ガス）、2次ストリッパー（カーボンフォ

イル)、ポストストリッパー(カーボンフォイル)をどのように組み合わせるかによって計算結果は大きな幅を持つが、おおむね $P(\text{Mass-Energy Product}) \leq 400 \text{ MeV} \cdot \text{emu}$ を妥当な値にした。これはタンデム加速器の分析電磁石と同等の値である。

これによって電磁石の大きさは、電磁石の磁束密度を $B(\text{T})$ 、偏向半径を $\rho(\text{m})$ とすると、  
 $B \rho = 0.14397 P$

ここで最大のMass-Energy Product( $P$ )を $400 \text{ MeV} \cdot \text{emu}$ 、 $B$ を最大で $1.6 \text{ T}$ とすると $\rho = 1.8 \text{ m}$ が求められる。諸元をTable 2.3.1に示す。

## (2) 振分電磁石

分析電磁石によって厳密に単色化されたイオンビームは振分電磁石によって3つの出口ポート( $0^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $50^\circ$ )のいずれかへ偏向されそれぞれの実験装置へと導かれる。

振分電磁石の大きさは、分析電磁石で偏向されたイオンの最大のMass-Energy Productが $400 \text{ MeV} \cdot \text{emu}$ と規定されていることから、振分偏向角が最大の $50^\circ$ の曲率半径 $\rho = 1.893 \text{ m}$ と設定したとき、最大磁束密度 $B = 1.54 \text{ T}$ と計算される。諸元をTable 2.3.1に示す。

Table 2.3.1 電磁石主要諸元

	分析電磁石	振分電磁石
磁極間隔	36 mm	40 mm
磁極巾(フラット部)	240 mm	240 mm
最大磁束密度	1.61 T	1.54 T
曲率半径	1800 mm	1893 mm(50度)
偏向角	90 度	0度, 25度, 50度
均一範囲( $6 \times 10^{-4}$ )	$\pm 40 \text{ mm}$	$\pm 40 \text{ mm}$
電流	470 A	395 A
電圧	73 V	40 V
冷却方式	直接水冷	直接水冷
冷却水流量(差圧 $3.5 \text{ kg/cm}^2$ )	16 l/min	9.2 l/min
重量	約14t	約21.5t

## (3) 3連4重極電磁石

イオンビーム収束用3連4重極電磁石の設計は、その磁場勾配と磁極長の決定が基本となる。

分析電磁石は、イオンのMass-Energy Productを最大 $400 \text{ MeV} \cdot \text{emu}$ として設計されているので3連4重極電磁石の大きさも、この値を計算式に取り入れれば決定できる。ここでは磁極口径7

8 mm、本体を自然空冷とする等の条件を勘案し妥当な値として、磁場勾配 8.90T/m、磁極長250-500-250 mmと決定した。

ただし、25°ライン、50°ラインに設置しているものについては実験者側から、より強力な電磁石の要望が出ていたので基本構造を同じくして、磁場勾配10T/m、磁極長 300-500-300 mmと決定した。諸元を Table 2.3.2 に示す。

Table 2.3.2 4重極電磁石主要諸元

	3連4重極電磁石	3連4重極電磁石	2連4重極電磁石
磁場勾配	8.9 T/m	10 T/m	2.5 T/m
磁極長	250 mm (Q1, Q3) 500 mm (Q2)	300 mm (Q1, Q3) 500 mm (Q2)	140 mm
磁極口径	78 mm	78 mm	33.38 mm
電流	28 A	28 A	15 A
電圧	25 V (Q1, Q3) 35 V (Q2)	25 V (Q1, Q3) 35 V (Q2)	25 V
冷却方式	自然空冷	自然空冷	間接水冷
冷却水量	-	-	2 l/min (圧損 3 kg/cm <sup>2</sup> )
重量	1,500 kg	2,700kg	170 kg
使用場所	ブースター室	ターゲット室	加速ユニット間

#### (4) 電磁ステアラー

イオンビーム操作系の電磁ステアラーの設計は、イオンビームを何メートル先で何センチメートルずらせることを可能とするかを想定して計算すればよい。ここでもイオンのMass-Energy Productを最大400MeV·emuとして規定して計算式に取り入れれば電磁ステアラーの磁極長と磁場強度が求められる。諸元を Table 2.3.3 に示す。

Table 2.3.3 電磁ステアラー主要諸元

	ステアラー(X/Y)	ステアラー(X)	ステアラー(Y)
磁場強度	0.1 T	0.1 T	0.1 T
磁極間隙	80 mm	40 mm	40 mm
磁極長	140 mm	100 mm	100 mm
磁極巾	200 mm	60 mm	60 mm
電流	10 A	5 A	5 A
電圧	17 V	7 V	7 V
冷却方式	自然空冷	自然空冷	自然空冷
重量	340 kg	70 kg	70 kg

### 2. 3. 5 ビームライン・ユーティリティ

前節までに述べた加速ユニットやビームライン系の機器を駆動するには電力、圧空、特殊冷却水などを必要とする。これらの供給については後述3. 3 建家設備において各機器の仕様に合わせた分電盤や配管（バルブ止め）が機器近くの壁面に設置されている。

これらの配線、配管は床下ピットやダクトに色々な系統が混合して行われ、現場でのルート確認や供給元が不明確になりやすいため、この節ではそれらを考慮して負荷側の接続状況について記述する。

#### (1) 電力

ビームライン機器への電力供給は近くの分電盤から行われ、比較的大きな負荷については分電盤のブレーカーに1対1で対応するような配線を基本としている。これは電源投入時の動作確認や異常時の処置に対応しやすくするためである。

したがって第1重イオンターゲット室に設置されているバンチャー、サブバンチャー用ターボポンプの電力は同室の分電盤から供給され、他の機器にはブースター室側の分電盤から供給されている。

AC100VやAC115Vで駆動する測定器や制御回路については位置、使用目的に合わせて集合させ系統別に分けて供給している。各ケーブルは電流容量に適合したキャプタイヤケーブルを使用している。1995.12現在の電力配線系統図をFig. 2.3.5 に示す。

#### (2) 窒素・圧空ガス

窒素ガスは保守のためにビームラインの真空を破るとき、圧空はファラディカップ、ビームラインバルブおよび超電導ブースターに係るターボポンプ用ゲートバルブの駆動に使用されている。

ブースター室南側壁面近くにバルブ止めで設置されたそれぞれ2ヶ所のガス配管を床下ピット内を銅管で、床面からは架台などを利用しシンフレックスチューブで分配しながら各機器までの配管を行っている。窒素・圧空ガス配管系統図をFig. 2.3.6 に示す。

#### (3) 特殊冷却水・排気管

特殊冷却水は分析電磁石、振分電磁石、2連4重極電磁石に供給され分析電磁石、振分電磁石はそれぞれが単独で使用し、2連4重極電磁石（9台）は1ヶ所からすべてに供給されている。

他に実験装置用としてブースターターゲット室に2ヶ所の供給口がある。

排気管はターボポンプや油回転真空ポンプを使用し実験装置内の高真空の維持やビームラインダクト内を真空に引くために配管されておりブースター室に6ヶ所、ブースターターゲット室に5ヶ所設けられている。

油回転真空ポンプなどの真空ポンプを使用する場合は、その真空ポンプ出口から排気バルブまでをエレファントホースなどで接続し大気に放出できるようになっている。

特殊冷却水配管系統図をFig. 2.3.7、排気配管系統図をFig. 2.3.8 に示す。

## 2. 3. 6 ビームライン制御系

ブースター・ビームラインのビームハンドリング・デバイスの制御については、既存のタンデム加速器制御系のCAMAC（計算機と計測、制御機器の国際標準インターフェイス）系を拡張することで進められた。タンデム加速器の制御は、制御コンソールと各デバイス間をCAMAC信号によって通信し、これらの通信データは当室で開発され1992年10月より運用開始された並列処理（開発名ACCELL）計算機によって処理が行われている。したがって、ブースタービームラインのビームハンドリングについてもタンデム加速器同様にコンソールCRT、シャフトエンコーダー、アサインメーター等によって操作が行われる。制御場所については、ブースター加速器が当面RF室で制御されることからタンデム制御室およびRF室について検討されたが、将来的にはブースター加速器本体もタンデム制御室から制御することとするため、ビームハンドリングのデバイスについてはタンデム制御室の制御コンソールのみで行う方法となっている。

なお、真空バルブ制御については、既存制御系同様CAMAC系を bypass せずハードワイヤーによっており、タンデム制御室の真空系ディスプレイに増設された操作系で制御される。

### (1) CAMAC系

CAMAC信号は、計算機とのインターフェイスであるハイウェイドライバと各CAMACクレートの間をシリアル信号で転送されている。各デバイスの近傍には、CAMACクレートが設置され制御命令の判別を行い、情報の入出力を行っている。CAMACクレートは、その取り扱う情報の種類や数量、デバイスからの距離、保守管理等からブースタービームラインでは3ヶ所に分けられて設置されている。Fig. 2.3.9 にCAMAC系シリアルハイウェイ系統図を示す。

ビームハンドリング・デバイスには、個々に機器種類や設置エリア等を示す名称が付けられており、タンデム加速器と同様な名称が踏襲されているので詳細は「タンデム加速器運転手引」を参照されたい。ビームライン・デバイスの配置図はFig. 2.3.2-3 に示されている。また、下記にCAMACクレートと設置エリアの関係を次に示す。

エリア記号	設置エリア	CAMACクレート
・B1	バンチャー入口～リニアック入口	NO. 11（既存に増設）
・B2	リニアック部分	NO. 17
・B3	リニアック出口～分析電磁石入口	“
・B4	分析電磁石～振分電磁石	NO. 18
・BA	ターゲット 0°ライン	“
・BB	“ 25° “	“
・BC	“ 50° “	“

各CAMACクレートには、下記に示すCAMACモジュールが制御情報数に応じて数個挿入され、デバイスとの制御信号の授受が行われている。また、デバイス制御回路との信号レベルの整合、ノイズ除去、スイッチャードの機能を持ったCAMACインターフェースが、各CAMACクレートと同一回路ラックに設置されている。ブースター・ビームラインの制御データ数は、平成6年12月現在約300となっている。

- ・ハイウェイ制御 : Serial Crate Controller(Kinetic 3952)
- ・数値データ制御 : 8Channel D/A Converter ( " 3112 A1A)
- ・数値データモニタ : 16Channel A/D Converter( " 3512 E1A)
- ・ステータス制御 : 24bit Output Register ( " 3074 E1A)
- ・ステータスモニタ : 24bit Input Gate ( " 3471 A1C)

## (2) デバイス制御回路

ビームハンドリング機器の制御用回路は、それぞれの機器の近傍のビームライン架台の支柱にEIA規格ラックマウントで設置され、CAMACインターフェースからの信号によって制御され、また、デバイスの状況のモニタ信号を送り出している。デバイス制御回路は、そのほとんどが従来のタンデムのビームライン制御回路に改良を加えたものが設置されており、下記に主な特徴、機能等を示す。

- ・ファラデーカップ・コントローラ : LOG-AMP内蔵 (電流測定範囲 $10^{-12} \sim 10^{-4}$ )
- ・ダブルスリット・コントローラ : 4極遠隔駆動、4チャンネルLOG-AMP ( " )
- ・アパチャー・コントローラ : 駆動制御なし、2チャンネルLOG-AMP ( " )
- ・Qレンズ電源 : 制御信号用絶縁増幅器内蔵
- ・ステアラー電源 : " )
- ・真空バルブ・コントローラ : 真空悪化インターロック  
ビームによるバルブシート焼損防止機能

## (3) 電磁石の電源

ブースターによって加速されたイオンのMass-Energy Product は、最大400MeV $\cdot$ emuと想定して、分析電磁石ならびに振分電磁石の大きさは設計されている。これらの電磁石の大容量定電流電源の特性は、イオンビームの品質を大きく左右するものである。特に分析電磁石用電源は、どの加速器においても綿密に検討され、慎重な設計がなされる。しかし、電源の安定度の規定は、従来あいまいで不明確な表現が多かった。そこで我々は明確にこれを定めた。

まず、条件として室温および冷却水温の変動 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、入力変動 $\pm 5\%$ のもとで、電磁石のゆらぎはオーバーオール(コイル、制御部、電源の変動を全て含め)で、定格値の $\pm 20\text{ppm}$ まで追求することとした。このうちコイルの抵抗値変化は $10^{-6}$ 以下とみて無視し、制御部(DAC)は $\pm 5\text{ppm}$ に設定することとし、この上で、電源の安定度を出力5~100%の範囲において

出力設定値の $\pm 5$  ppm + 定格値の $\pm 5$  ppm

と定めた。

上記の達成のため主要部品の選定を以下の通りとした。

- ・ shunt (温度係数  $\pm 1$  ppm/ $^{\circ}$ C)
- ・ 高安定度オペアンプ (入力オフセット電圧温度係数 $0.6 \mu$  V/ $^{\circ}$ C)
- ・ 回路用抵抗 ( $\pm 0.6$  ppm/ $^{\circ}$ C)

電源の方式は小型、軽量化が得られるスイッチング方式を開発しなかったが、この種の大容量電源は一般化されていないので、従来通り、前段にスライドトランスをおいたパワートランジスタ・ドロップ方式とした。

制御方式は、より高精度、高分解能が求められるので、加速器管理室で開発した独自の新システムを採用することとし、CAMACインターフェイスは経由しない。即ち、トランスピュータ内蔵のデバイスコントローラを搭載したカードパックシステムケース3/4Uに、コントロール用DACモジュール(18ビット)、モニター用ADCモジュール(12ビット)、ステータスコントロール/リードバック用デジタルI/Oモジュールをプラグインしたシステムで電源を制御している。

なお、デバイスコントローラは光ファイバーを介して、タンデム加速器並列処理制御システム(ACCELL)にリンクしている。

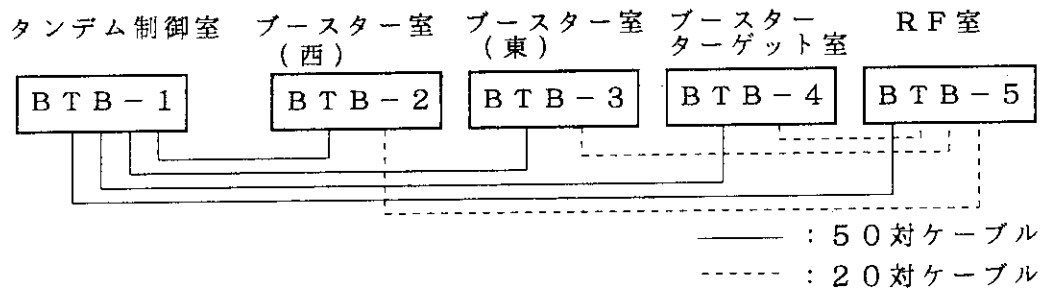
磁場の設定は電流値をコントロールしながら、NMR磁場センサーの共鳴信号を捕らえながら行う。なお、将来は、NMR磁場センサーの読取値をフィードバックして、直接、磁場設定を行えるシステムに改良する予定である。

#### (4) 制御信号ケーブル

CAMAC系とは別にハードワイヤーによる制御信号送受信ケーブルがタンデム制御室とブースター建家にある4ヶ所の端子盤ボックスとの間に敷設されている。主にビームラインの真空系制御情報や放射線インターロック等の制御信号の送受信に使用されている。また、RF室とブースター室、ブースターターゲット室間にも敷設され同様に使用されている。各系統とも将来の信号数の増加を想定した対数になっている。ケーブル仕様および系統を下記に示す。

名称 : 計装用ケーブル (SPVV(Cu, Fe)三菱電線)  
 導体サイズ :  $0.5 \text{ mm}^2$  (7/0.32)  
 対数 : 50P および 20P  
 遮蔽 : 軟銅テープおよび軟鉄テープ各1枚重巻き  
 外径 :  $0.96 \text{ mm}$  (50P=35.0mm、20P=23.0mm)  
 耐電圧 : AC 1,000 V (1分間)





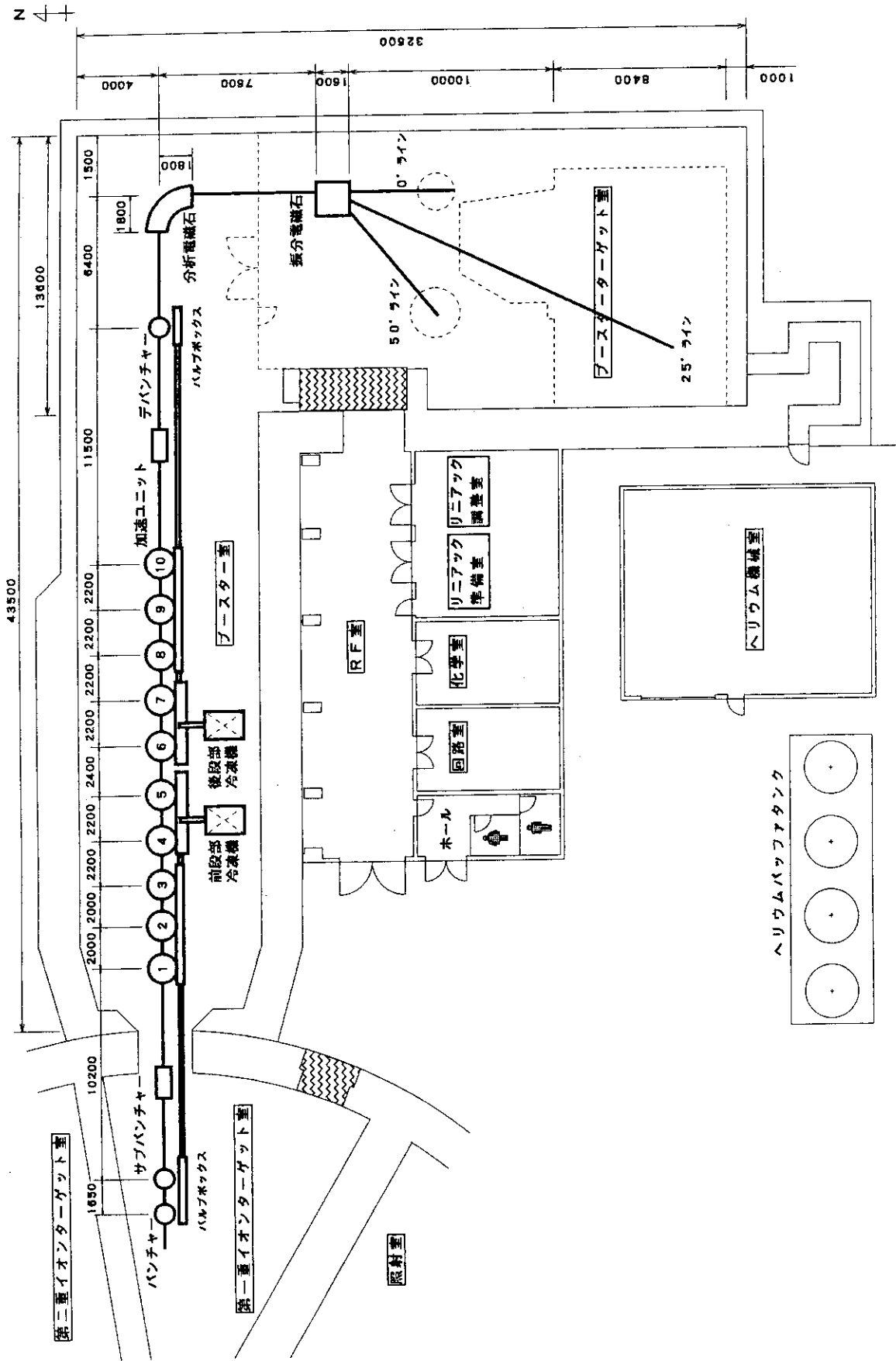


Fig. 2.3.1 ブースター主要機器配置図

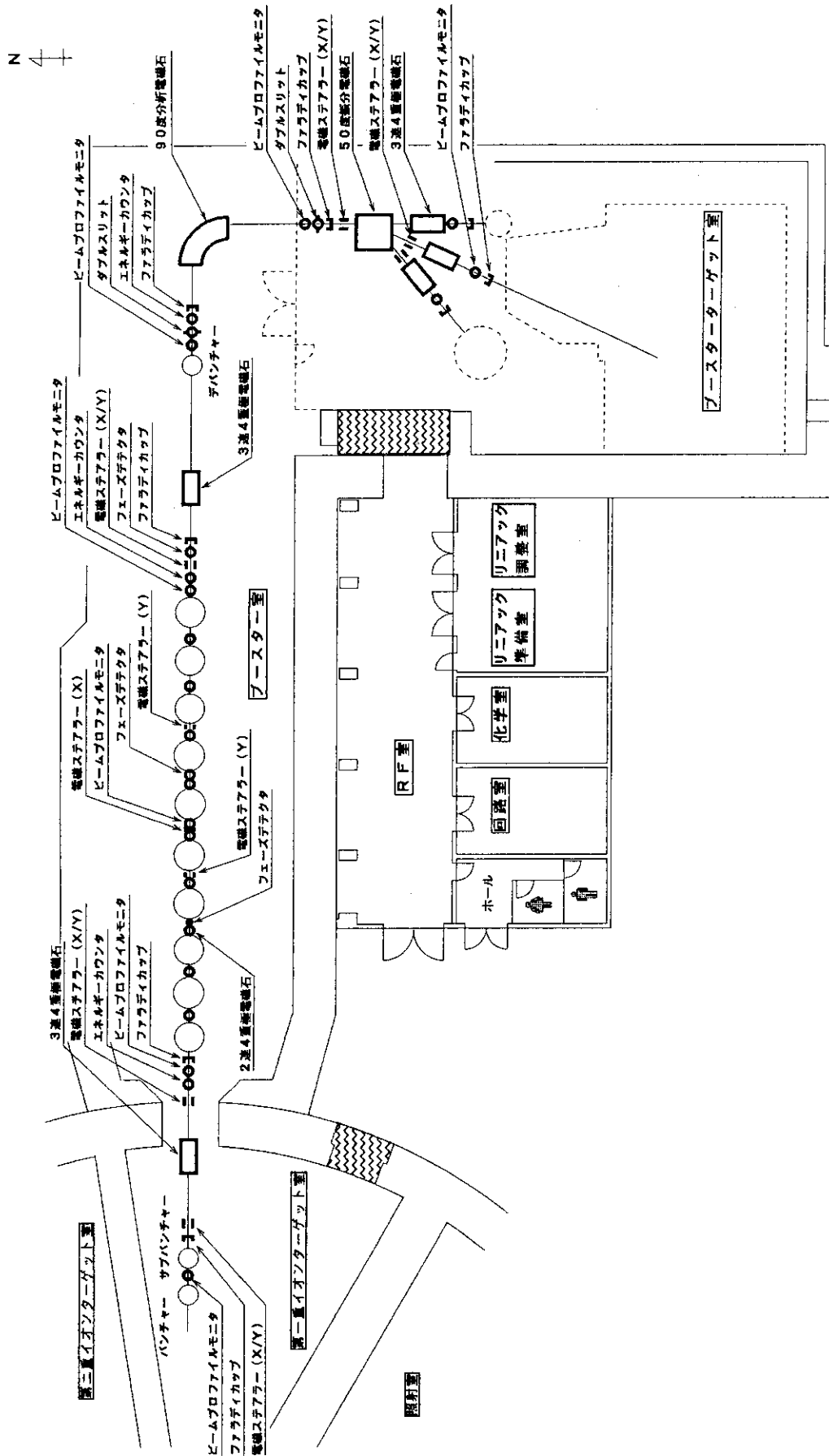


Fig. 2.3.2 プースタービームハンドリング系機器配置図

N 4 ↑

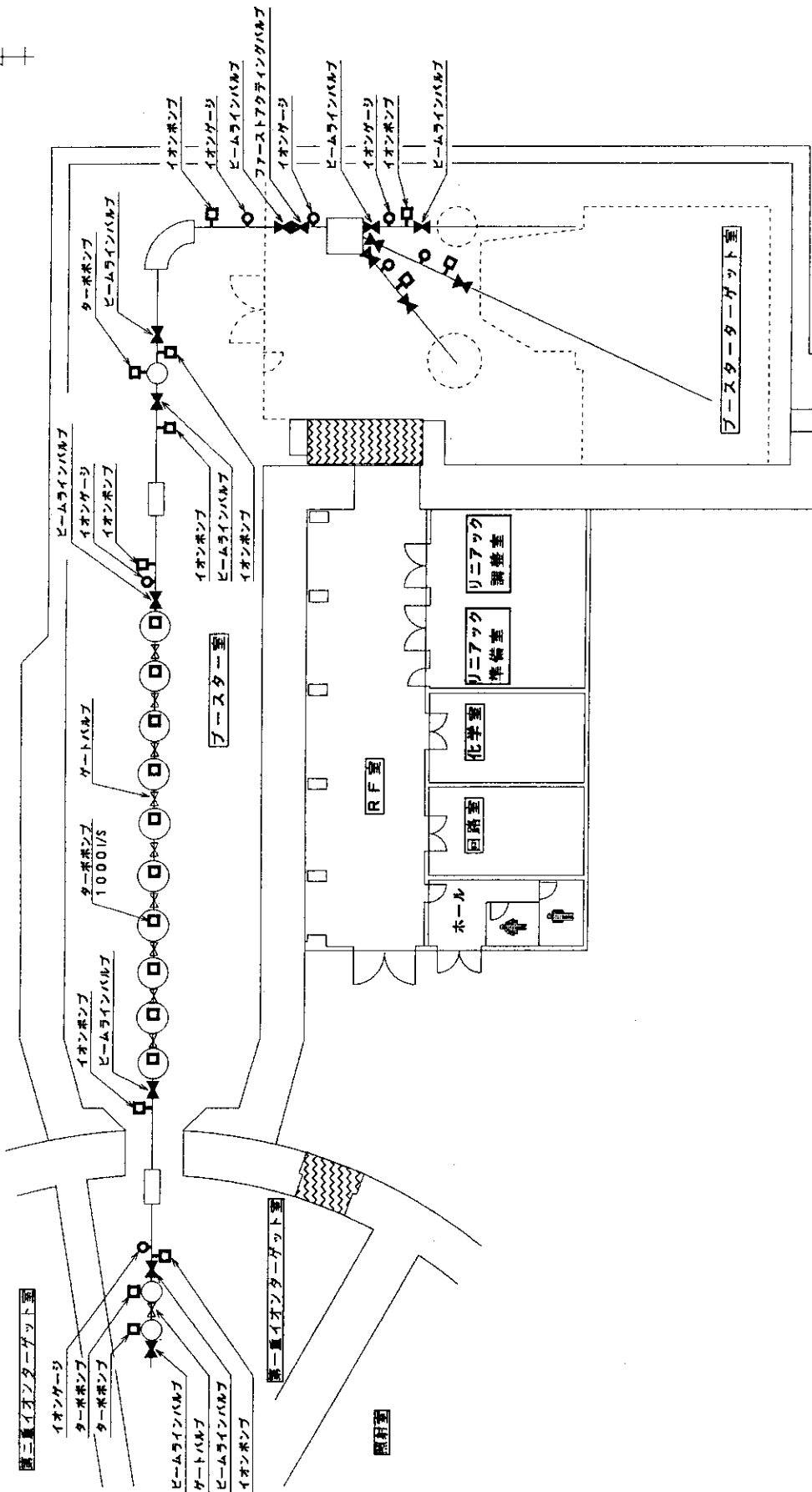


Fig. 2.3.3 プースタービームライン真空系機器配置図

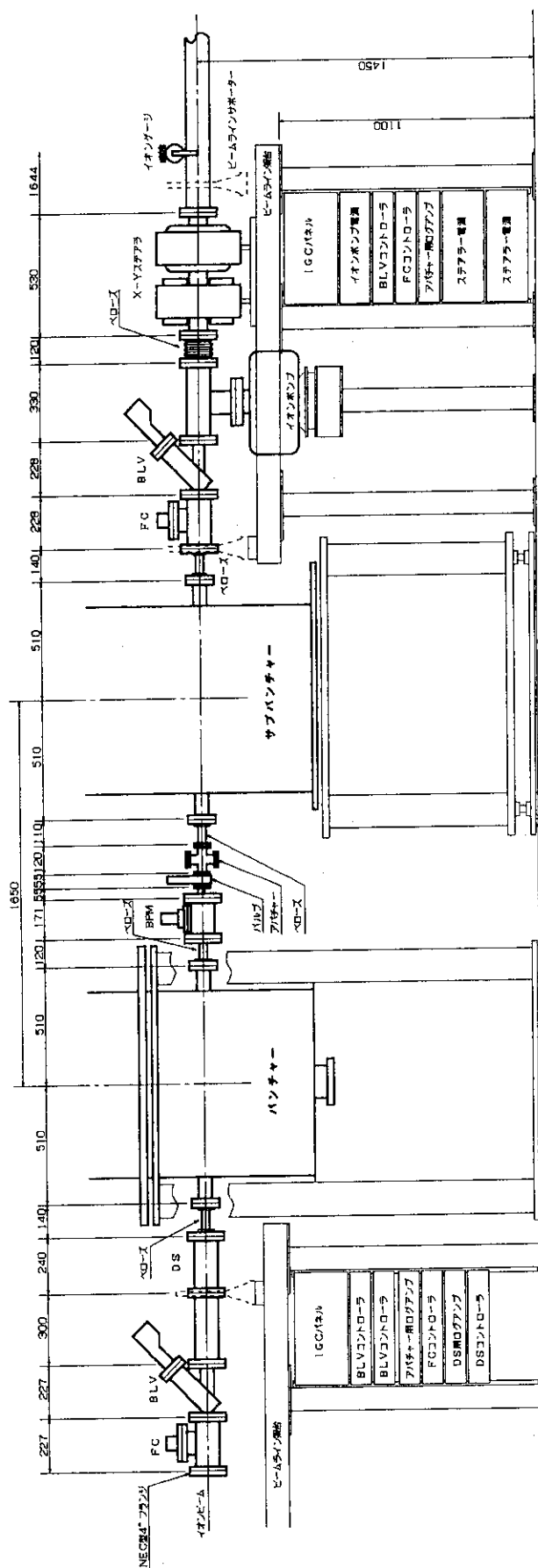


Fig. 2.3.4a ビームライン外観図  
バンチャッカーサブバンチャッカー周辺

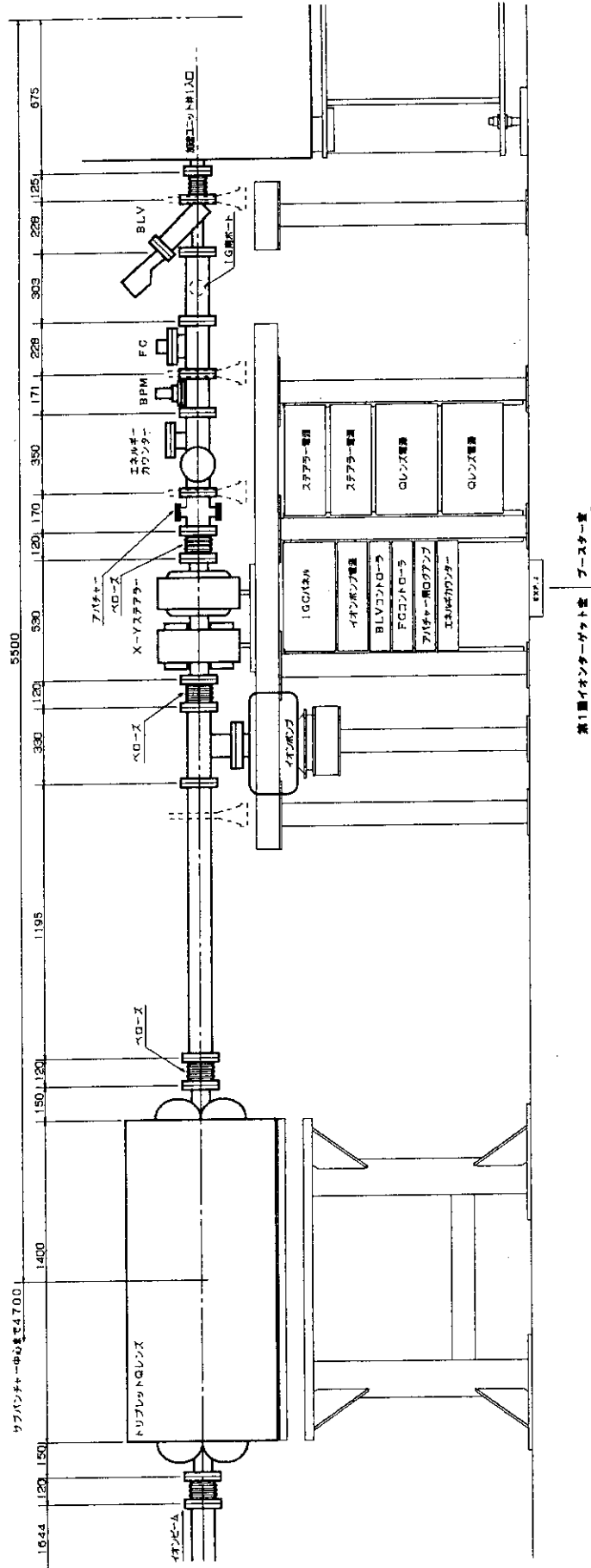


Fig. 2.3.4b ビームライン外観図  
3連4重極超磁石一加速ユニット入口

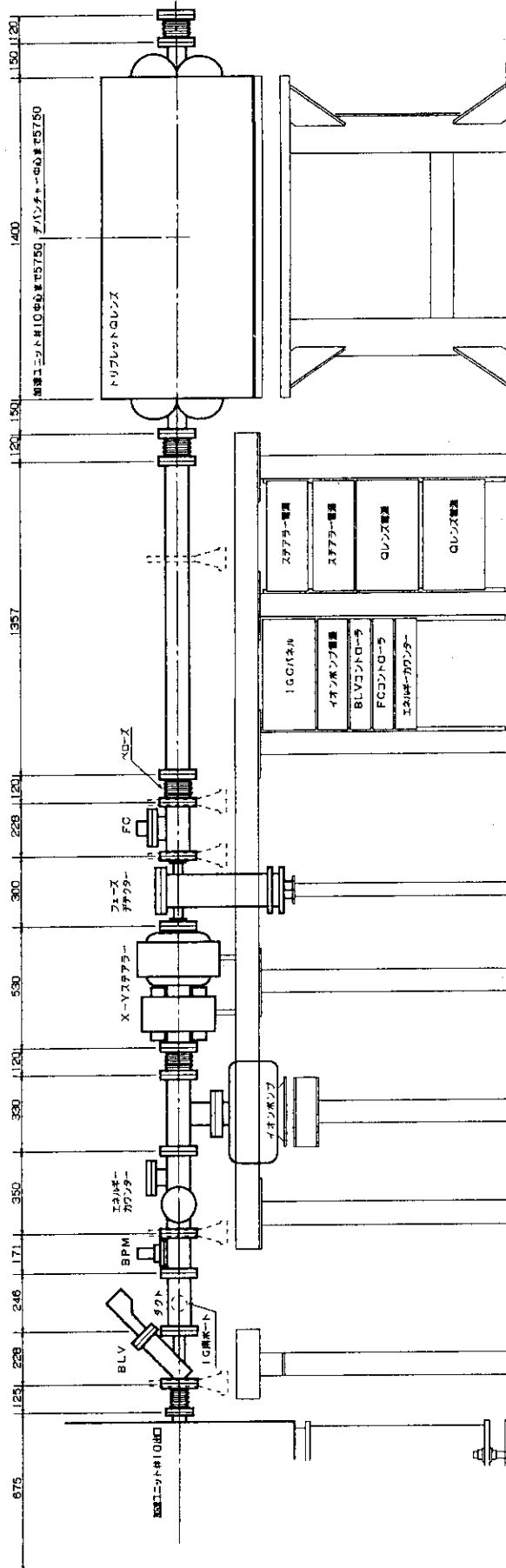


Fig. 2.3.4c ビームライン外観図  
加速ユニット#10-Qレンズ

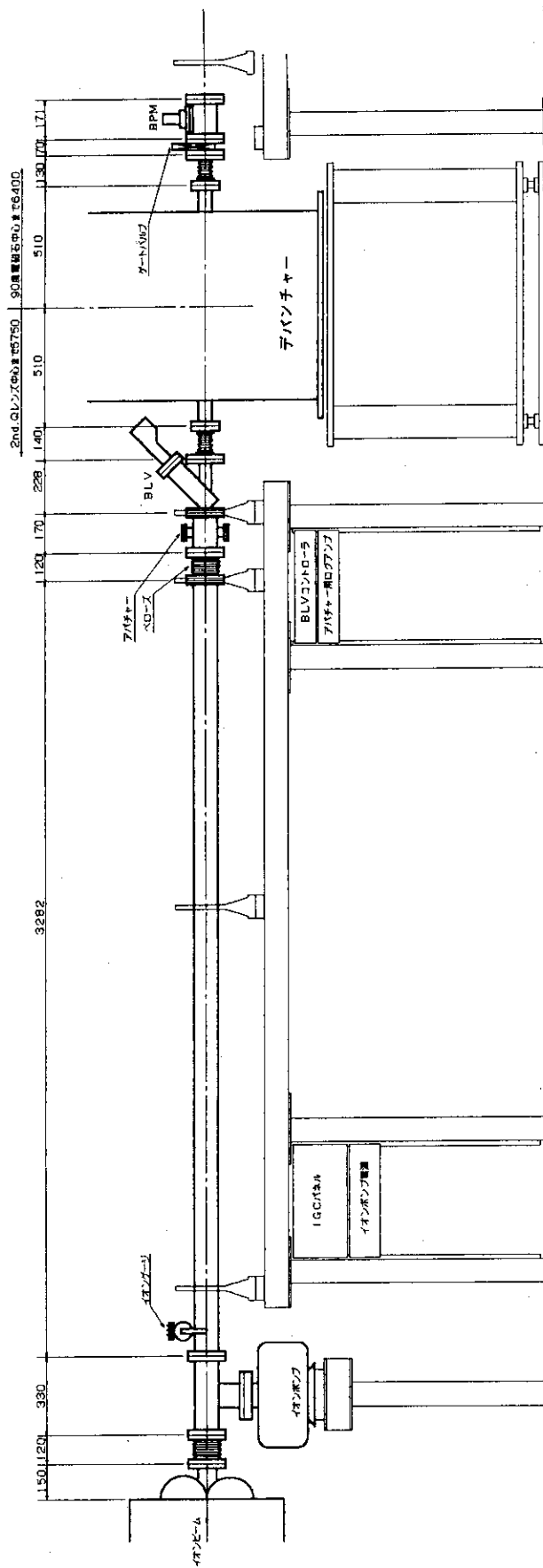


Fig. 2.3.4d ビームライン外観図  
デパンチャー入口周辺



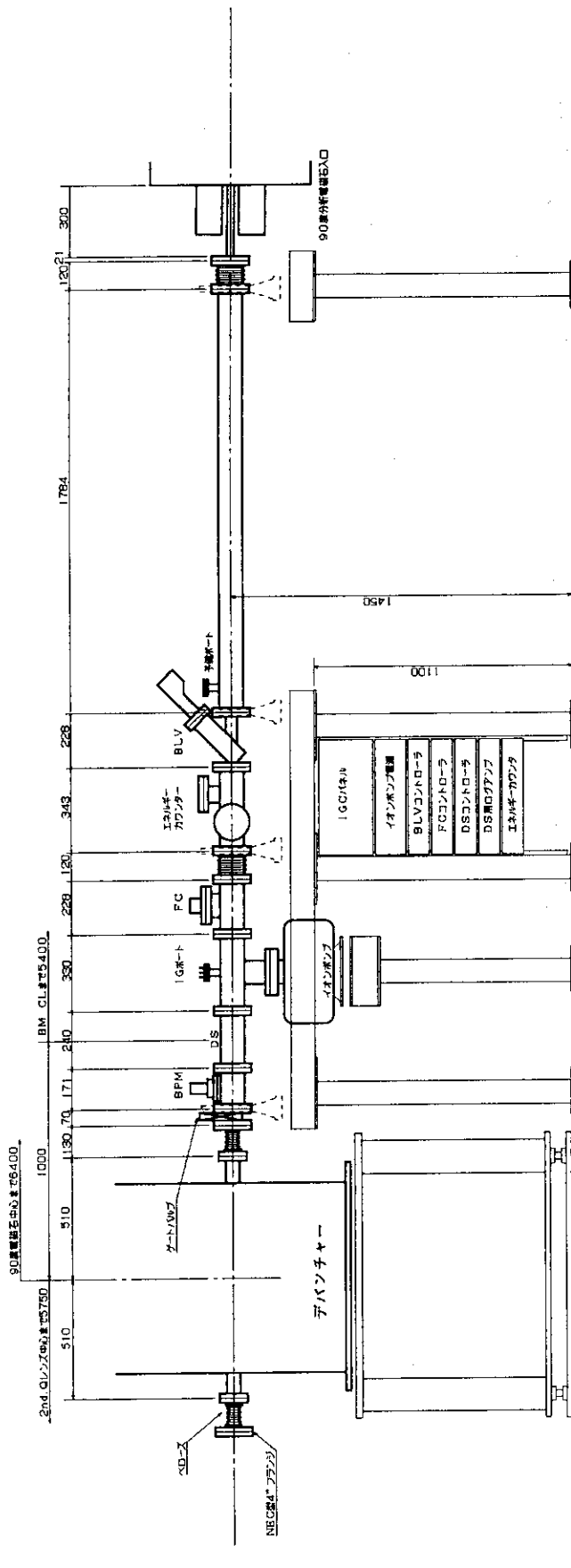


Fig. 2.3.4e ビームライン外観図  
デバウンチャー分析電磁石

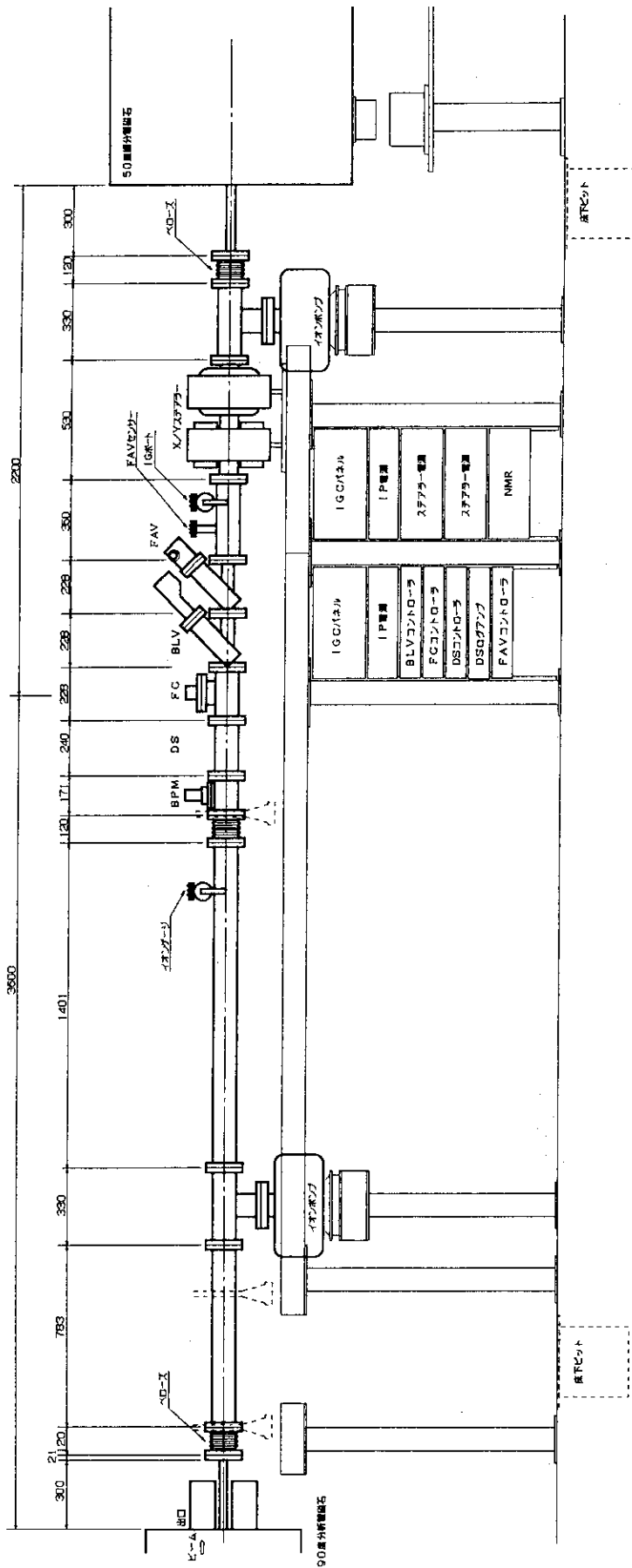


Fig. 2.3.4f ビームライン外観図  
分析電磁石一振分電磁石

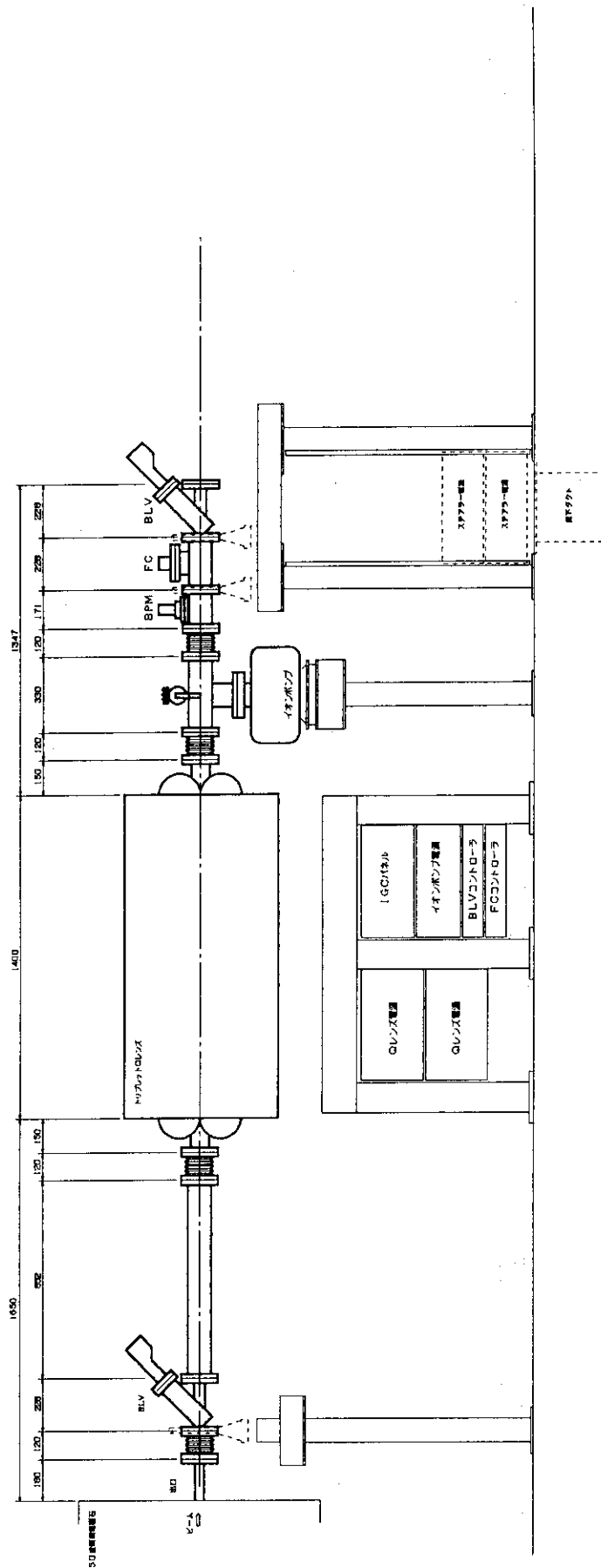


Fig. 2.3.4g ビームライン外観図  
振分電磁石ターゲットライン (00)

BB(25)ライン完成予想図

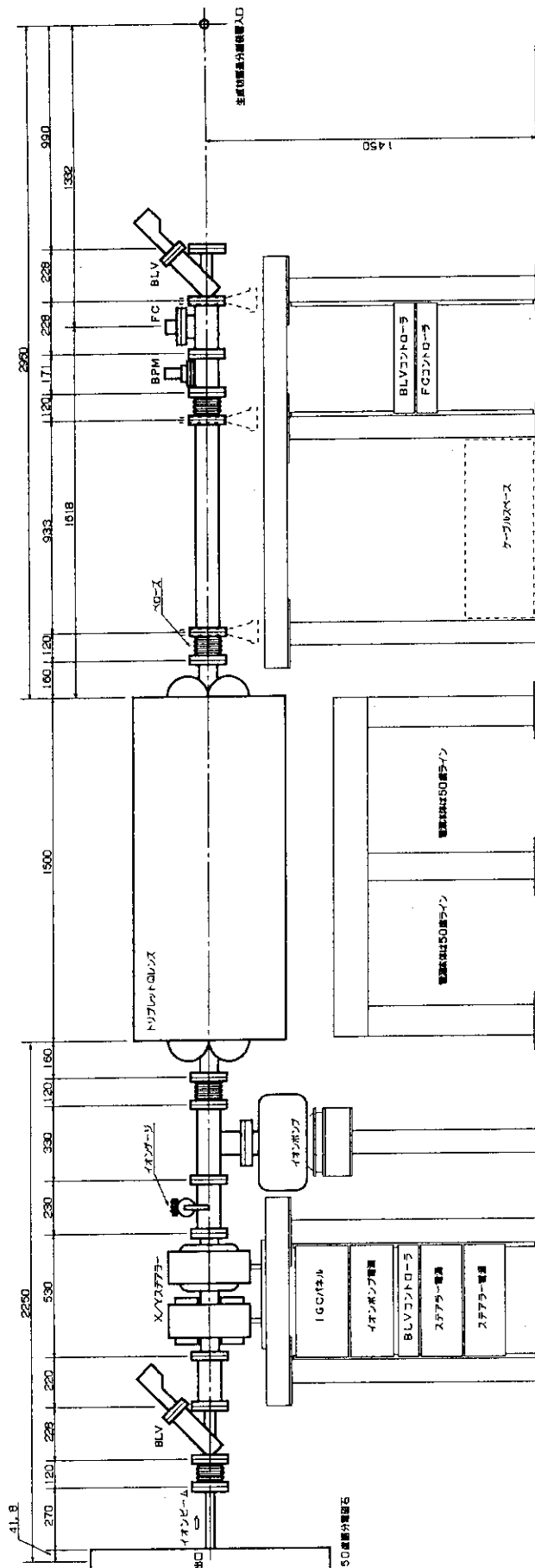


Fig. 2.3.4h ビームライン外観図  
振分電磁石ターゲッターライン (25)

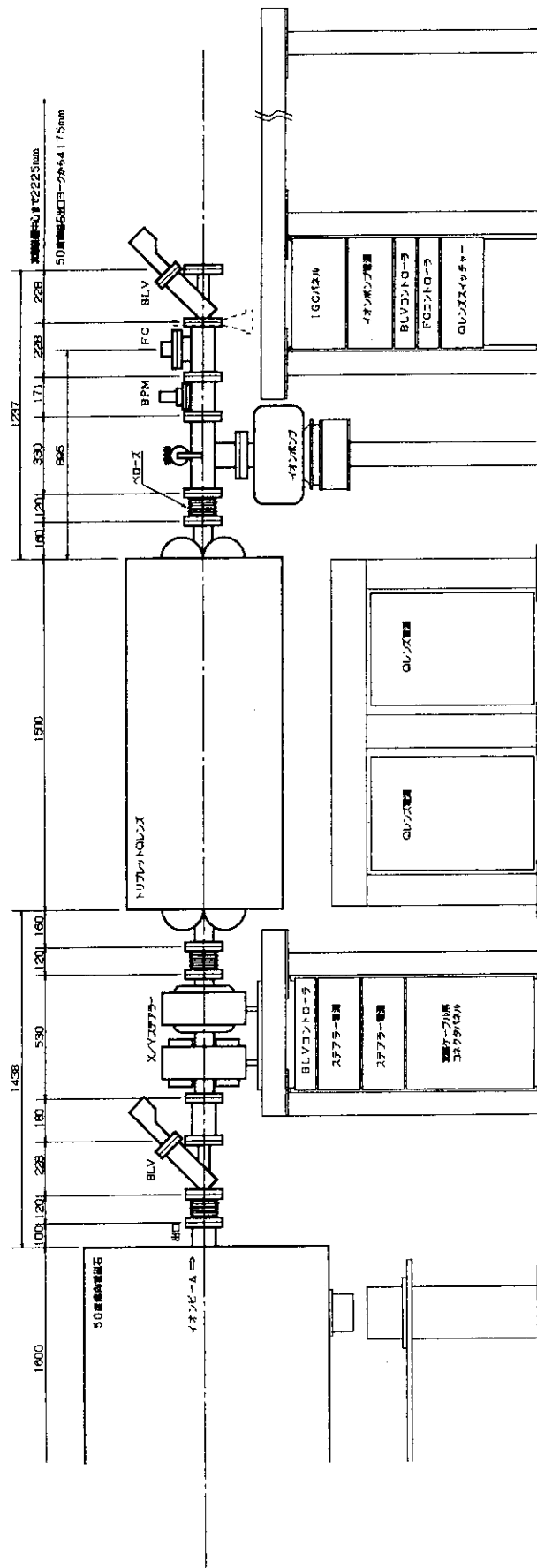


Fig. 2.3.4i ビームライン外観図  
振分電磁石ターゲットライン (50)

N 4 +

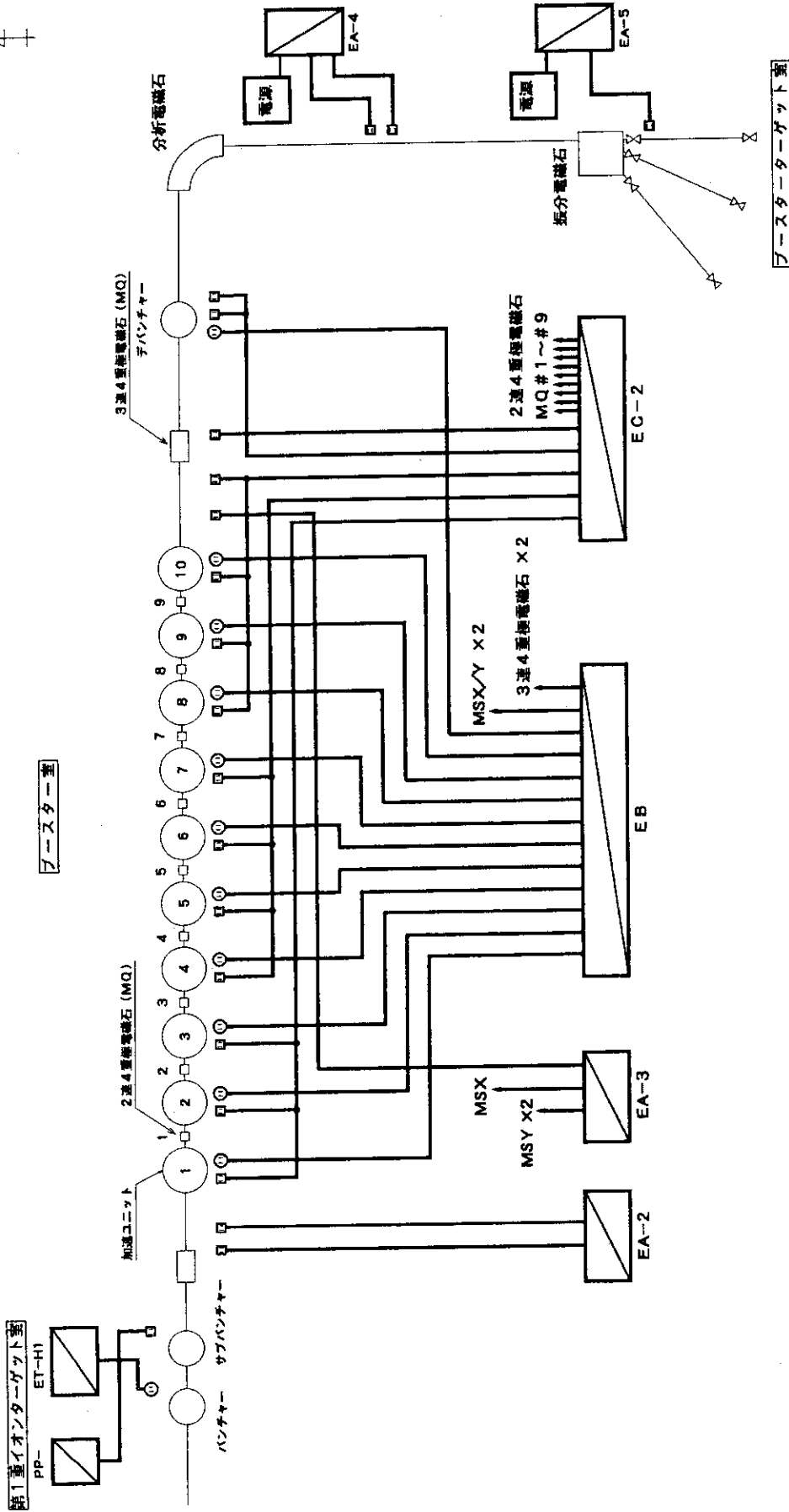
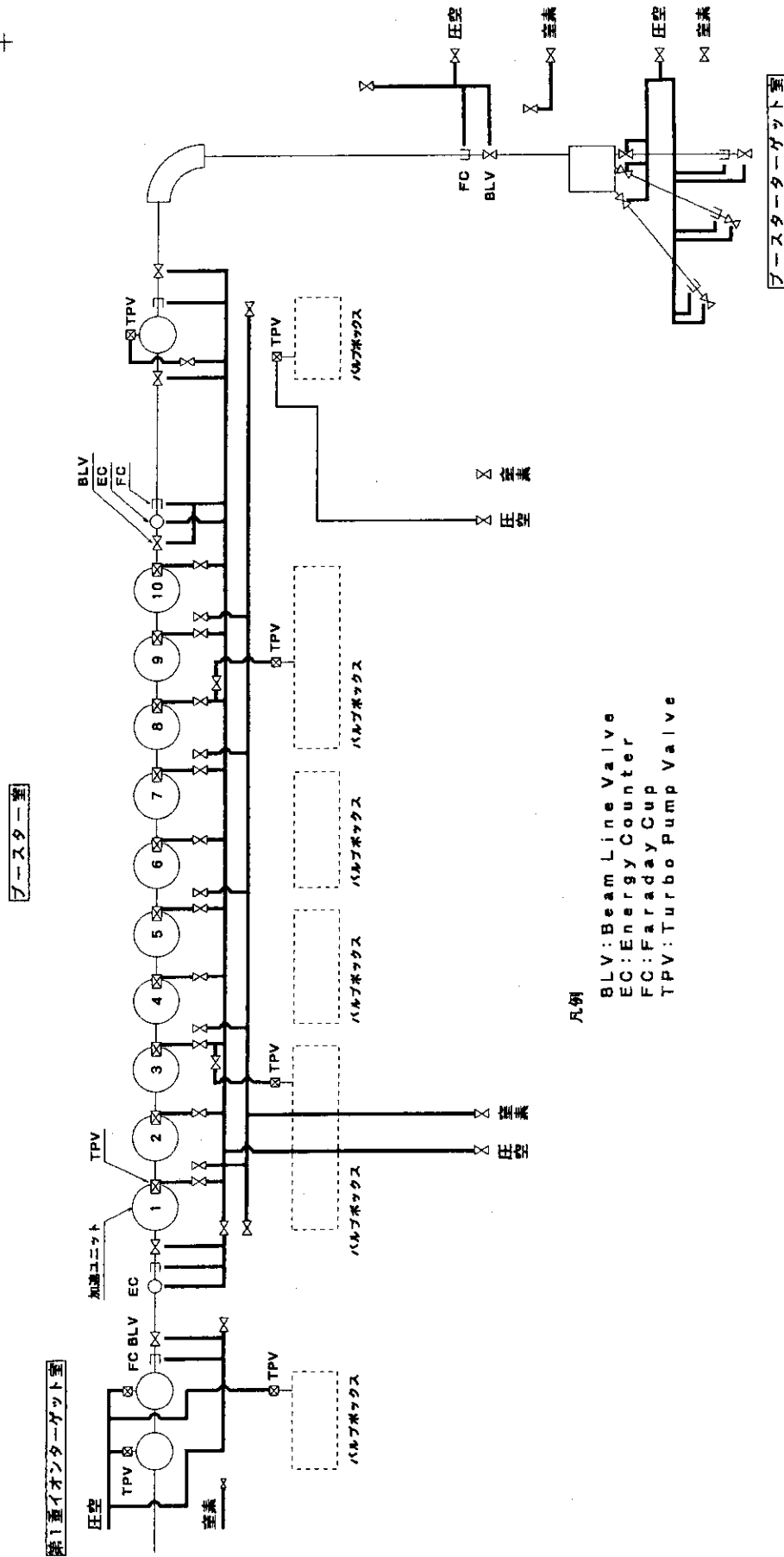


Fig. 2.3.5 ビームラインユニットイリテイ  
電力供給配線系統図

N 4 十



凡例  
 BLV: Beam Line Valve  
 EC: Energy Counter  
 FC: Faraday Cup  
 TPV: Turbo Pump Valve

Fig. 2.3.6 ビームラインユニティリテイ  
 空素・圧空配管系統図

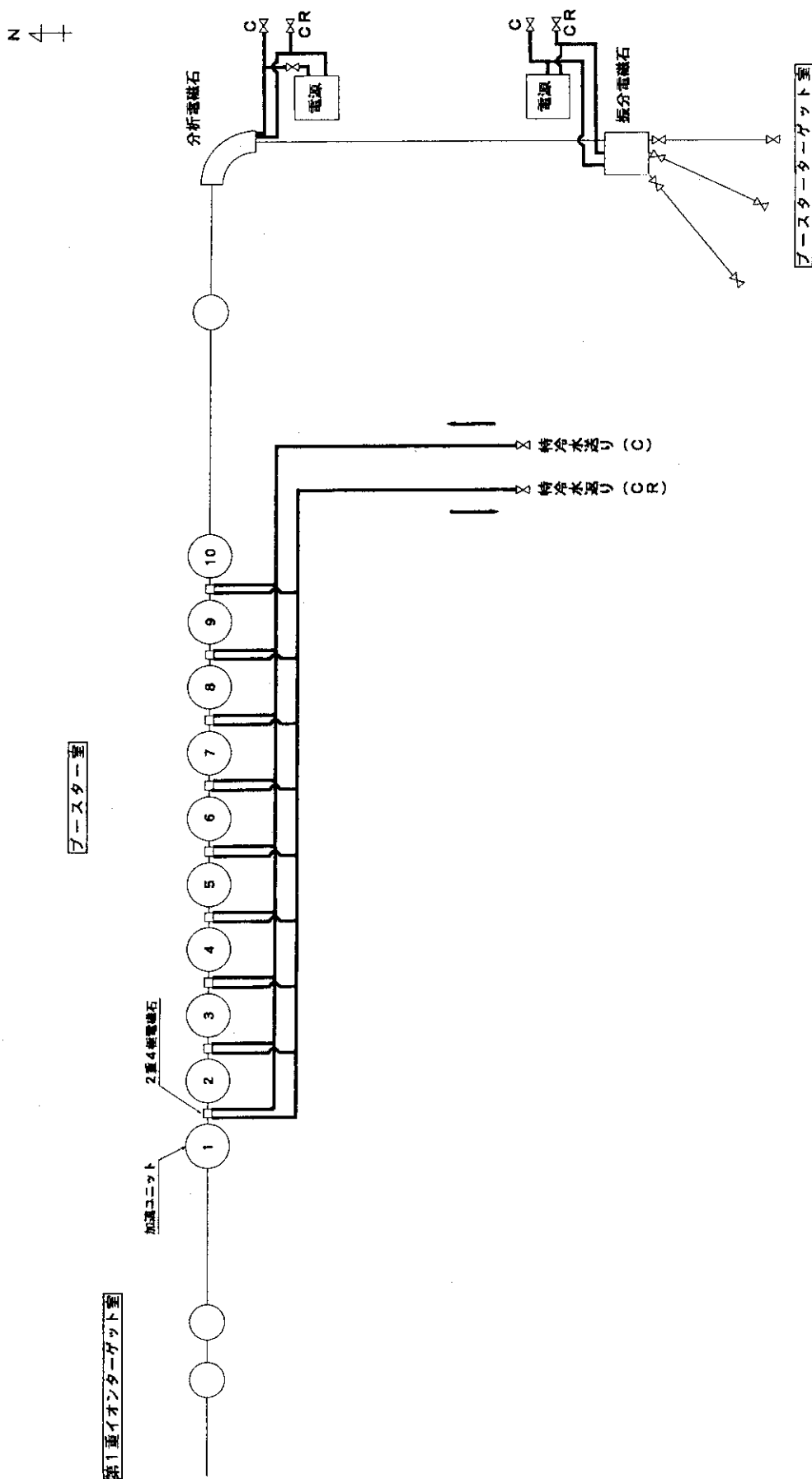


Fig. 2.3.7 ビームラインユニットイリテイ  
特殊冷却水配管系統図



24+

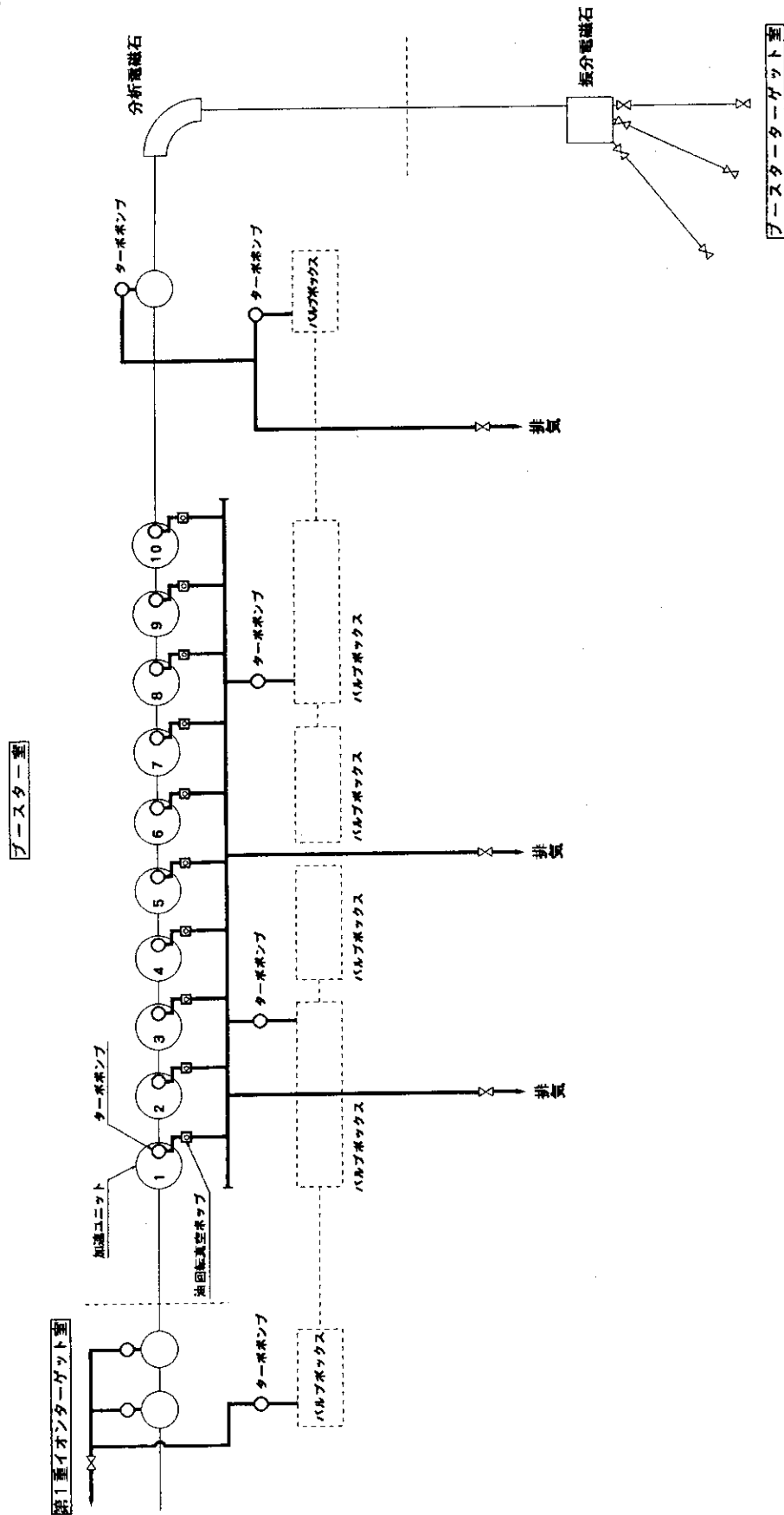


Fig. 2.3.8 ビームラインユニオンターゲットイリテイ  
排気配管系統図

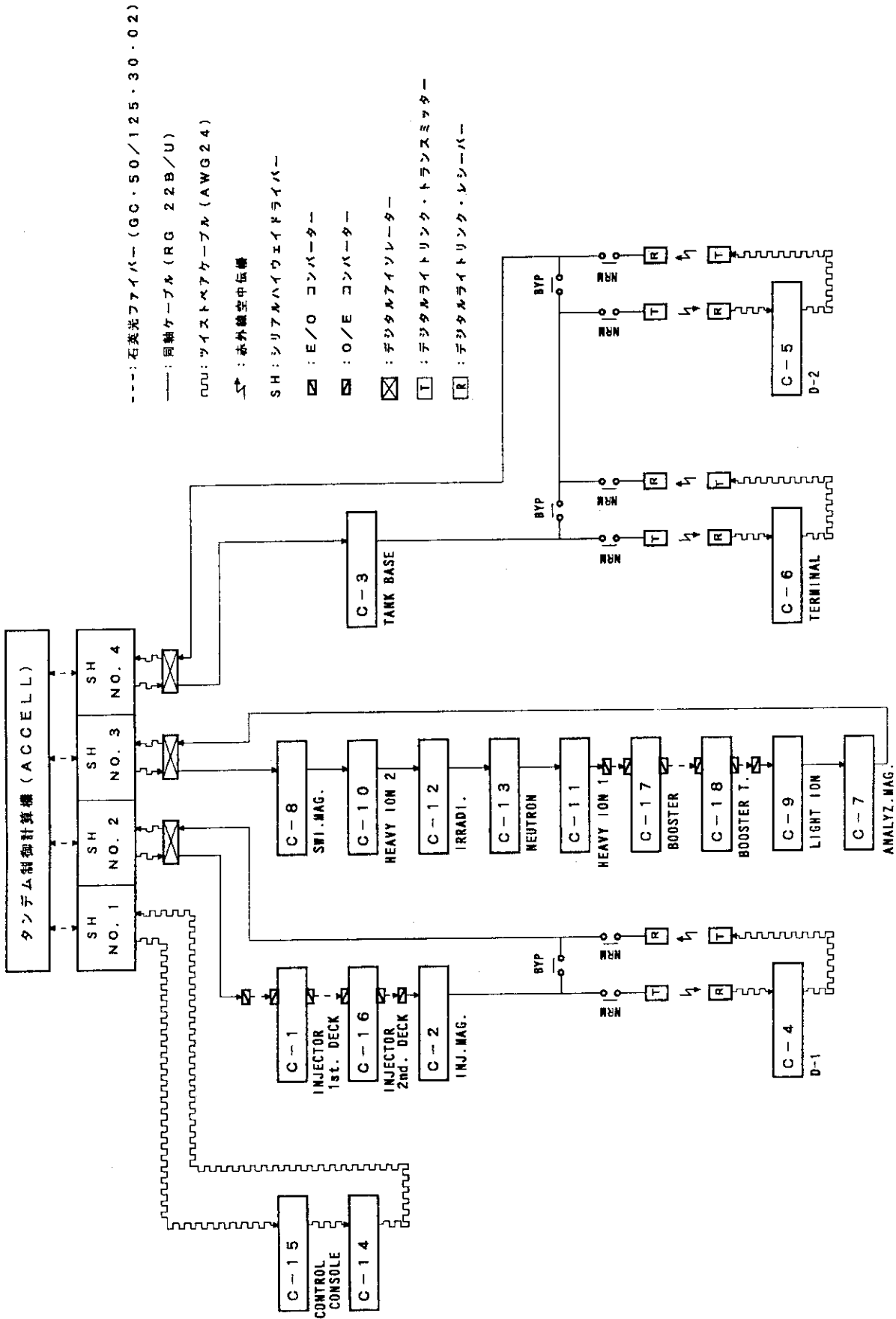


Fig. 2.3.9 CAMACシリアルハイウェイ系統図

### 3. 建家

#### 3.1 ブースター建家

ブースター建家は、1989年（平成1年）10月敷地予定地の地質調査が終了し1990年（平成2年）3月建家詳細設計が完了した。ブースター建家は既設タンDEM棟第一重イオンターゲット室の東側に増築し、主に鉄筋コンクリート造りと一部鉄骨造りの平屋構造で、タンDEM加速器建家とは加重バランスを考慮して完全に独立な構造とした。建家工事は1990年（平成2年）8月に着工し電気設備と機械設備工事を含め1992年（平成4年）4月に完成した。

#### 3.2 建家の構成

ブースター建家は既設タンDEM棟第一重イオンターゲット室の東側に増築した。建家は主に鉄筋コンクリート造りと一部鉄骨造りの平屋構造で建築面積は1,229.9m<sup>2</sup>、延床面積は1223.2m<sup>2</sup>である。高さは既存建家のB1Fレベルから最高8.99mである。第一重イオンターゲット室と増築建家外壁間はそれぞれの建家の加重バランスを考慮して完全に切離し、ゴム止水板等で防水する接続構造となっている。

建家はブースター加速器本体とヘリウム冷凍機を設置するブースター室、加速ビームを使用して実験するためのブースターターゲット室、加速器制御用RF室、機器の準備調整等に使用するリニアック準備室、リニアック調整室、化学室、回路室および独立建家のヘリウム圧縮機用機械室で構成されている。

ブースター室とターゲット室は放射線しゃへいのため厚さ最大2mのコンクリート壁および一部外壁部分は土盛で覆れた構造となっている。ターゲット室には大型機器搬入を兼ねたサイドステップ式しゃへい扉の出入口と緊急避難用の迷路式通路がある。ブースター室、ブースターターゲット室には、それぞれ2.8トンおよび5トンの天井クレーンが設置してある。火災時の排煙設備としてRF室に排煙用トプライトが2箇所、リニアック準備室およびリニアック調整室に各1箇所設置されている。

Fig. 3.1 に建家の平面図を、Fig. 3.2, 3には断面図を、Fig. 3.4 にはヘリウム機械室の平面および断面図を示す。建家各室の詳細については建家竣工図を参照されたい。Table 3.1 に建家各室の床面荷重および構造を示す。

### 3. 2. 1 建家付属主要機器

#### (1) シャへい扉

R F室とターゲット室間の開口部にはコンクリート鋼板張の電動サイドステップ式シャへい扉があり主な仕様は以下のとおり

開口寸法	3000W × 3000H
扉寸法	5200W × 3600H
扉重量	115 トン
走行速度	1.2 m/min

#### (2) クレーン

ブースター室およびターゲット室には実験装置組立、機器移動用に各2.8トンおよび5トンの天井クレーンが設置されており操作性仕様は以下のとおりで、Fig. 3.5 にクレーンの配置図を示す。

##### 2.8トンクレーン

巻上速度	1.7~10 m/min (無段変速)
走行 "	2.5~25 m/min ( " )
横行 "	2.5~25 m/min ( " )
操作方式	床上押釦操作

##### 5トンクレーン

巻上速度	6.7 m/min
走行 "	21 m/min
横行 "	21 m/min
操作方式	床上押釦操作

### 3. 3 建家設備

増築棟の建家に付随する設備には、電気、給排水、空調、窒素ガスおよび圧縮空気供給や排気設備等がある。この項では、これら設備を系統的に解説し、また特徴的なことや使用上制約のあるものについて記している。Table 3.2 に設備機器関連一覧表を示す。なお、それぞれの詳細図については、竣工図を参照されたい。また、安全設備については第4章を参照されたい。

#### 3. 3. 1 電気設備

増築棟の電気設備は、ブースター加速器、液体ヘリウム製造施設、実験装置等の電力仕様に

合わせて設計、施工されている。また、建家構造に合わせた空調、排水、照明、放送・通信設備等が設置されている。

### (1) 受変電設備

増築棟で使用する主な電力は、ブースター加速器、ヘリウム製造施設のヘリウム圧縮機用モーター、反跳型生成核分離実験装置、空調機等の建家機械設備等である。このうちヘリウム圧縮機用モーターの電力が比較的大きいため合計電力は、既存タンデム棟の消費電力にほぼ匹敵する。受変電設備の設計において先ず検討されたことは、増築棟専用の受変電設備を新設するか、またはタンデム加速器棟の既存受変電設備の改造、増設で可能かどうかである。増築棟の負荷を電圧別にみると 6.6KVの高電圧を直接使用するヘリウム圧縮機モーターと、低電圧装置・機器類および非常系に分類でき、受電、変電および両方を含む部分について検討が行われた。主な検討結果は、下記のとうりである。

- ① 高電圧・大電力を必要とするヘリウム圧縮機モーターの電力を含めた増築棟の合計電力において、既存受電設備容量に余裕がある。
- ② 既存のタンデム加速器棟・変電設備は、負荷用途別にトランスが分けられており、二次側母線の補強により、増築棟の負荷の増加に対応できる。
- ③ 増築棟の負荷電圧の種類が多いため受変電設備の新設は高電圧機器を多く必要とするため、既存設備の改造よりも経済的に不利である。
- ④ 既存受変電設備に改造、増設するエリアを確保できる。

これらの結果から、新たな受変電設備の新設をせずに既存設備の改造および分岐・増設によって行えることを確認し、設計・施工された。したがって、増築棟で使用する全ての電力が、タンデム棟の既存受変電設備から供給されている。

高電圧電力はヘリウム圧縮機モーターに使用され、タンデム機械室の既存高圧盤設備にヘリウム圧縮機専用高圧盤を増設し、ヘリウム機械室の起動器盤に供給している。

低電圧電力には、ブースター加速器、実験装置、空調設備および排水設備、照明設備等があり、タンデム棟機械室の既存低圧盤脇に分岐盤を増設し、増築棟ブースターターゲット室の主幹盤に供給している。

非常系電力は、タンデム棟同様に増築棟が地下1階レベルにあるため排水ポンプおよび非常照明に供給されている。これらは、通常時は商用電力によって供給されているが、停電時にはタンデム棟機械室のエンジン発電機系に自動的に切り替わるようになっている。

### (2) 主幹盤

増築棟で使用する低電圧電力は、ほとんどがブースターターゲット室に設置された主幹盤を経由して供給される。主幹盤内には、各電圧系統毎および負荷用途毎にブレーカーが分けられて設置されている。各ブレーカーの遮断容量および主幹盤の一次、二次の配線は、想定される負荷需要率によって決められている。ブースター加速器系・実験系の各実験盤では個別には100%

の電力が使用可能であるが、系統での需要率は以下のようにになっている。各系統については Fig. 3.6 の電力系統図に示す。したがって、各系統の設備容量に対して下記の需要率以上の電力使用があると主幹盤内のブレーカーが遮断することになる。なお、実験盤の内容については、次項に解説してあるので参照されたい。

	3相200V	单相100V/115V	3相400V
EA盤系：	30%	30%	—
EB盤系：	70%	50%	—
EC盤系：	30%	70%	—
ED盤系：	—	30%	—
He 低圧盤：	80%	—	—
E（装置専用）：	—	—	80%

### (3) 実験用分電盤

ブースター加速器および実験装置用電力は、主幹盤より実験用分電盤を経由して供給される。この分電盤の特徴は、3相 200V系にスター結線による 3相 4線引を採用しているため、3相 200Vおよび相間における 200V、中性点間における 115Vの 3種類電圧を得られることである。また、これらの分電盤は操作部に扉を設けていないため、ブレーカーの開閉状態が目視できること、電圧種類別に整理してあるので操作性に優れた構造となっている。実験用分電盤の種類は、負荷側の電力仕様に合わせて多種類の盤を製作すると制作費がかさむという経済的理由との兼ね合いにより 4種類に統合してある。下記に用途、特徴などを示す。

- ・ EA盤：3相および单相 200V、115V、100Vの多用途に使用できるよう汎用性を持たせてあり、装置近傍および作業エリアを想定している場所に配置されている。(14面)
- ・ EB盤：3相200Vブースタークライオスタット用真空ターボポンプおよび 3連4重極電磁石レンズ、ステアラー等数KW負荷用。(1面)
- ・ EC盤：单相100V/115Vブースター加速器制御回路 (ASI、RFAMP) およびビーム制御回路 (CAMAC、二重極電磁石レンズ) 用。(2面)
- ・ ED盤：单相100V/115V実験用測定回路専用クリーン電源 (第1重イオンターゲット室用 AVRから分岐されている)。(1面)

EA盤のブレーカーの内訳をTable 3.3 に、EB盤についてはTable 3.4 に、EC盤についてはTable 3.5 と3.6 に負荷接続状況を示す。実験盤の配置図をFig. 3.7 に示す。

### (4) 実験系専用電力

装置専用電力として、E-1～E-4の 4系統に 3相400Vが独立に配線されている。これらは、主幹盤にそれぞれ専用ブレーカーを有し、各装置に近い位置のEA盤内に端子止めとなっており、下記の装置専用で使用される。

- ・ E-1：分析電磁石 (50KVA、EA-4に内蔵)
- ・ E-2：振分電磁石 (30KVA、EA-5に内蔵)
- ・ E-3：実験装置 (30KVA、EA-6に内蔵)
- ・ E-4：反跳型生成核分離実験装置 (200KVA、EA-7に内蔵)

#### (5) ヘリウム圧縮機用電力

ヘリウム圧縮機は、2台の高電圧誘導電動機(各320KW)によって駆動される。このため交流3相6.6KVがタンデム棟機械室の高電圧分岐盤から単独で配線されている。高電圧誘導電動機においては、起動電流の大きさによる受電設備の保護協調が問題となるため、起動方式と保護協調特性の関連について検討された。検討の結果は、Fig. 3.8に示すように既存受電設備の安全確保のためには、下記の起動条件が必要であることが判明した。

- ・ヘリウム圧縮機起動条件
- ・起動方式：全電圧起動とする  
(当初、起動補償器によって起動電流を規制することを検討したが、採用される誘導電動機の始動特性の関係から始動補償器の使用は時間的に保護協調が採れなくなる)
- ・起動操作：2台の電動機の同時起動は絶対に行わない  
(1台当たりの起動電流が196Aで定格運転時の約6倍の大きさになり、2台の同時起動は、保護協調が採れなくなる)

また、既存タンデム棟の最大電力使用実績(夏期実験中=約1,250KW)値におけるヘリウム圧縮機の起動においても保護協調がとれることが確認された。これらの条件を基にして高電圧分岐盤機器および高電圧配線の設計が行われている。

低電圧電力は、ヘリウム圧縮機冷却ポンプ等の補機類用として3相200Vの専用系統でヘリウム機械室の低圧盤に供給されている。また、ヘリウム冷凍機・圧縮機制御用電力として単相200Vをヘリウム機械室のEA盤から分岐し、別途設置の無停電電源装置を通して供給されている。

#### (6) 照明設備

照明設備の照度および照明器具の特徴は、各室の作業形態により下記のようになっている。

- ・ RF室 : 作業面上にて 700Lux  
(CRT無反射型蛍光灯)
- ・ 回路室、化学室 : 作業面上にて 300Lux
- ・ リニアック準備室、調整室 : "   
(防塵性を考慮し水銀灯、防塵処理施工済)
- ・ ブースター室 : 床面上にて 300Lux
- ・ ブースター・ターゲット室 : "
- ・ ヘリウム機械室 : 床面上にて 200Lux

なお、各部屋の照明器具の一部は非常系電源に接続されており、停電時には自動的に非常系に切り替り、保安の確保ができるようになっている。

#### (7) 放送、通信設備

放送、通信設備には、下記のものが設置されている。

- ・ 構内放送 : 既存のタンデム棟制御室の弱電制御卓のアンプから第一重イオンターゲット室のスピーカー配線を分岐して拡張
- ・ ページングインターホン : 構内放送同様にページング系から分岐して拡張
- ・ ワイヤレスインターホン : 構内放送同様にワイヤレスインターホン系のアンテナ線(高周波同軸ケーブル10D2V)を拡張
- ・ 電話 : タンデム棟玄関脇に設置の電話端子盤(TL-1-1既存)から増築棟玄関の端子盤(TB)を經由して配線(10端子の内実装電話機 6台)

Fig. 3.9 に放送・通信設備の配置図を示す。

### 3. 3. 2 給排水設備

給水系には、浄水、ろ過水、特殊冷却水の3種類があり、既存タンデム棟の各水槽から供給される。排水は、浄水、ろ過水については屋外の排水槽に集められ一般排水路に放水され、特殊冷却水は循環系のため特殊冷却水槽に戻されている。各設備の配管末端の配置図をFig. 3.10に示す。

#### (1) 浄水設備

浄水は、主に実験用流しに使用される。給水元は、タンデム棟3Fレベル屋上に既存の高置水槽(TH-2、 $2\text{m}^3$ )で、この水槽は機械室の受水槽からポンプで補給されている。TH-2からは、軽イオンターゲット室屋上を經由してRF室天井から増築棟内に配管され、自然落下によって供給される。

排水系は、実験用流し、床排水口、空調機ドレインなどから床下を自然勾配で屋外に増設されたNO.7排水槽に流れ込むようになっている。

#### (2) ろ過水設備

ろ過水は、実験装置冷却用、ヘリウム圧縮機系冷却用などに使用される。給水元は、浄水同様タンデム棟3Fレベル屋上の高置水槽(TH-3、 $5\text{m}^3$ )で、この水槽は機械室の床下に設置されている共用水槽からポンプで補給されている。TH-3からは、浄水同様のルートを通して自然落下によって供給される。各配管の末端はバルブ止めにしてある。

ろ過水系の排水は、実験装置冷却用では比較的流量が多く配管に圧力がかかり他の排水口に逆流するおそれがあるためバルブ止め配管にしてあり、ろ過水系排水専用配管でNO.7排水槽に



流れ込むようになっている。

### (3) 特殊冷却水設備

加速器のビーム・ハンドリング装置や実験装置の冷却水には、電気絶縁特性の良い水を必要とする。タンDEM棟では、この冷却水を他の水と区別する意味で特殊冷却水と呼んでおり、機械室内に 3m<sup>3</sup>の水槽が設置され、ポンプにより約4Kg/cm<sup>2</sup>Gで圧送され各装置と水槽間で循環系が構成されている。電気抵抗はイオン交換樹脂を通して約1MΩに管理され、水温は別系統の熱交換系によって 25±1°Cに保たれ、それぞれタンDEM制御室において監視ができるようになっている。増築棟へは、タンDEM棟B2Fレーザー光源室の軽イオンターゲット室の重イオンスペクトルメーター実験装置 (ENMA) 専用配管に分岐バルブを増設し供給している。重イオンスペクトルメーターおよび増築棟の反跳型生成核分離装置は、冷却水量が多いため同時に給水すると圧力低下をきたすため同時使用が規制される。配管材質は、純水に対する耐食性や経済性が考慮され、ヒシパイプクリーンが採用され、各末端は往復ともバルブ止め配管となっている。

### (4) 雨水排水設備

増築棟周辺の雨水は、建家のB1Fレベルをドライエリアとしているため、このレベルより低いレベルに設けられた排水槽に集められる。したがって、一般排水路へはポンプにより汲み上げられ排水される。増築棟は、建家の構造から雨水が南北に分断されるためそれぞれに排水槽が設けられ、北側は増設されたNO.6排水槽、南側は既存のNO.5排水槽に流れ込むようになっている。これらの排水ポンプは、非常電源系のバックアップ・ポンプを有し、夏期の雷雨などによる停電に対応できるようになっている。

## 3. 3. 3 窒素ガス・圧空・排気設備

### (1) 窒素ガス供給設備

ブースターおよび実験装置は、高真空状態で使用される。これらの真空装置は、極度に水分をきらうため、調整・点検等で大気圧にして開放する際、乾燥状態の導入ガスとして窒素ガスが使用できるように配管されている。供給元は、タンDEM棟南側ドライエリアに既存の液体窒素貯槽で、B2F地下通路の配管に分岐バルブを増設して配管されている。供給ヶ所は、ビームラインおよび実験準備作業が行われるエリアで、配管末端はバルブ止めになっている。圧力は、タンDEM棟と同様 5.6Kg/cm<sup>2</sup>Gで別途設置の減圧弁およびフィルターを通して各装置に供給される。

### (2) 圧縮空気供給設備

タンDEM加速器のビームハンドリング装置には、ファラデーカップや真空バルブなどのニューマチック動作をするものがある。タンDEM棟では、これらのために圧縮空気配管が設置しており、増築棟にも窒素ガス配管と同様に地下通路から分岐して配管されている。供給元は、タ

ンデム棟機械室に既存のコンプレッサーで、ゴミ・水分・油分が除去されて供給される。供給圧力は  $5.6\text{Kg/cm}^2\text{G}$  で、各配管末端はバルブ止めになっている。

### (3) 実験用排気設備

実験用排気設備は、真空ポンプ、実験装置等から出る水分、油分あるいは有害ガスの排気をスタックを用いて屋外に排出する設備である。使用目的に合わせて各装置近くに配管されているので、可とう性配管等によって接続すれば排気される。強制排気ではないので、配管抵抗を少なくするため建家構造を考慮し7系統に分けられている。各配管末端は、逆流防止のためバルブ止めになっている。なお、実験装置では、特殊なガスを流す可能性が有るので単独排気系となっている。

## 3. 3. 4 空調設備

ブースターおよび実験装置は、電子部品や精密機械部品等が多く使用され、その性能維持のためには、それぞれの装置に適した温湿度管理が必要とされる。増築棟の空調設備は、これらのことおよび建家構造等が考慮され、大容積の部屋には水を熱媒体として複数の機器を駆動する方式、小容積の部屋は個別空調方式とし、タンデム棟の既存空調とは独立したシステムとなっている。Table 3.7 と Table 3.8 に空調設備機器一覧表を示す。

### (1) 外気処理換気系

増築棟の各室の換気は、RF室に設置された外気処理機を通して、ゴミの除去、除湿、温度調節が行われ供給される。除湿、温度調節用の熱媒体には水が使用され、この水はRF室屋上に設置されたチーリングユニットおよび蓄熱槽によって作られている。換気風量は、各室の全容積に対して1時間に2回換気が行われる量になっている。

ブースター室とブースターターゲット室は、それぞれに給気口が設置されているが排気口は両室がドアで隔離されていない建家構造のため、両室を合わせて1ヶ所より強制排気されている。換気用配管は比較的太くなるため、放射線しゃへい壁を貫通する部分では有効壁厚が確保できるように考慮され設置されている。

化学室は、別途設置の実験用フードの排気が考慮され給排気量がバランスするようになっている。リニアック調整室は、陽圧ダンパによりRF室に排出され、RF室と回路室の排気と合わせて便所から屋外に強制排気される。

### (2) ブースター室、ブースターターゲット室系空調

空調機は、外気処理機と同一の水を使用した熱媒体によって行われる6台のエアハンドリングである。温湿度の設計基準は下記のようにになっている。

夏期	27 °C	50%
冬期	22 °C	40%

空調機は、両室共床面積が広いため分散して設置され、ダクト吹出しによって全エリアの温度が均一になるよう配置されている。温湿度の設定は、RF室に設置された自動制御盤（CP-1）によってチリングユニットと合わせて行われる。Fig. 3.11 空調設備機器配置図を示す。

### （３） 各室系

RF室、リニアック準備室（リニアック調整室も含めて）、化学室、回路室の各室には独立した空冷ヒートポンプ方式の空調機が設置されている。温湿度の設計基準値は、上記（２）と同等であり、各空調機の操作パネルによって設定が可能である。室内機の吹出口は、RF室のみダクト配管により数カ所の天井吹出しになっているが、他は室内機の吹出口によっている。室外機は、RF室の屋上にまとめられて設置されている。

### （４） ヘリウム機械室系

ヘリウム機械室は、大型の有圧式換気扇によってヘリウム圧縮機からの発熱を強制的に屋外に排出するように作られている。圧縮機本体は強制水冷によっているので、換気扇の選定に当っては想定される発熱量の殆どが圧縮機を駆動するモーターにあるものとして以下の式によって算定されている。

$$Q = \frac{H}{\Delta T \cdot C_p} = \frac{30,000}{(38-30) \times 0.29} = 12,930 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

ただし、H : 発熱量 [Kcal/h]

$\Delta T$  : 室内外温度差 [°C]

$C_p = \frac{\text{空気の比熱}}{\text{空気の比体積}} \text{ [Kcal/m}^3 \text{ °C]}$

排気側の換気扇サイズは、羽根径 60cmで静圧が 10mmH<sub>2</sub>Oにおいて上記風量を確保できる機種が選定された。吸入側は、換気扇を室内側に設置し逆回転させる方法とし、排気側の2台に対して逆回転による風量低下が考慮され、3台設置されている。

Table 3.1 各室の床面積・加重・構造

室名	床面積(内法) [m <sup>2</sup> ]	床面加重 [t/m <sup>2</sup> ]	床面積		仕上げ
			床厚 [mm]	構造	
ブースター室	380.7	4.3	鉄筋コンクリート 1500	エポキシ樹脂コーティング	
ブースターターゲット室	326.4	4.3	鉄筋コンクリート 1500	エポキシ樹脂コーティング	
R F 室	109.8	1.17	鉄筋コンクリート 150	エポキシ樹脂コーティング	
リニアック調整室	27.3	0.36	モルタル 鉄筋コンクリート 30 150	エポキシ樹脂コーティング	
リニアック準備室	29.4	0.36	モルタル 鉄筋コンクリート 30 150	エポキシ樹脂コーティング	
化学室	29.4	0.36	モルタル 鉄筋コンクリート 30 150	ビニールシート貼	
回路室	29.4	0.36	モルタル 鉄筋コンクリート 30 150	ビニールシート貼	
ヘリウム機械室	124.2	0.36	鉄筋コンクリート 150	エポキシ樹脂コーティング	
便所	12.5	0.36	鉄筋コンクリート 150	モザイクタイル貼	

Table 3.2 設備関連機器一覧表

	電気設備											給水設備				ガス供給			空調	その他										
	実験用分電盤等						通信設備					排水	給湯水	精水	精水	精水	精水	精水												
	EA	EB	EC	ED	朝	コンソ	コ	EL	EM	EL	一斉										パ	ン	ソ	ン	TV	流	20A	20A	15A	15A
ブースター室	4	1	1		1					3	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	5	3								
ブースター ターゲット室	4			1	3			1		2	1	1	1	1	2	4	3	1	2	2	7	3								
RF室	1		1					2	1	2	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1						
リニアック調整室	1										1	1	1		1	1			1	1	1	1								
リニアック準備室	1														3	1			1	1	1	1								
化学室	1										1	1	1		3			2		1	1	1								
回路室	1											1	1		4					1	1	1								
ハリウム機械室	1							1	1	1	1	1	1	1	7	2				1	1	1								
ホール・便所															3															
屋外								屋上	1															排水槽 3 排水槽 77° 4						
合計	14	1	2	1	6	62	5	2	8	8	8	5	2	9	15	5	3	10	10	17	11									

数字は設置数を示す  
電話は端子数 (95.12現在数)

Table 3.3 EA実験盤ブレーカー配列表

## EA盤

No	相・線・電圧	電流	
1	3φ3W200V	100A	
2	3φ3W200V	20A	
3	1φ2W115V	20A	
4	1φ2W115V	20A	
5	1φ2W200V	30A	
6	1φ2W100V	20A	
7	1φ2W100V	20A	
8	1φ2W100V	20A	コンセント専用
9	1φ2W100V	20A	コンセント専用
10	1φ2W100V	20A	予備

\*各室に設置、合計14面

Table 3.4 EB実験盤負荷接続表

## EB盤(ブースター室)

3φ3W200V 各20A		1φ2W200V 各20A	
1	ターボポンプ #1	13	MQ B1-1
2	ターボポンプ #2	14	MQ B3-1
3	ターボポンプ #3	15	MS B1-2
4	ターボポンプ #4	16	MS B3-1
5	ターボポンプ #5	17	予備
6	ターボポンプ #6	18	予備
7	ターボポンプ #7	19	予備
8	ターボポンプ #8	20	予備
9	ターボポンプ #9	21	予備
10	ターボポンプ #10	22	予備
11	ターボポンプデバンチャー(VB6)	23	予備
12	予備	24	予備

\*バンチャー、サブバンチャーの電力は第1重イオンターゲット室のET盤より供給

Table 3.5 EC-1 実験盤負荷接続表

## EC-1 盤(RF室)

No	1 $\phi$ 2W115V 各20A		
1	回路ラック No.2, No.4		
2	回路ラック No.7, No.9		
3	回路ラック No.12, No.14		
4	予備		
5	予備		
	1 $\phi$ 2W100V 各20A		
6	RF AMP B, SB	15	RF AMP #9
7	RF AMP #1	16	RF AMP #10
8	RF AMP #2	17	RF AMP デバンチャ
9	RF AMP #3	18	回路ラック No.2, No.4
10	RF AMP #4	19	回路ラック No.7, No.9
11	RF AMP #5	20	回路ラック No.12, No.14
12	RF AMP #6	21	予備
13	RF AMP #7	22	He液面計
14	RF AMP #8	23	He流量調節弁

Table 3.6 EC-2 実験盤負荷接続表

## EC-2 盤(ブースター室)

No	1 $\phi$ 2W115V 各20A		
1	ビームライン #1(B1エリア~加速ユニットNo.3)		
2	ビームライン #2(加速ユニットNo.4~No.7)		
3	ビームライン #3(加速ユニットNo.8~B3エリア)		
4	ビームライン #4(デバンチャー周辺)		
5	CAMAC		
	1 $\phi$ 2W100V 各20A		
6	Q電磁石レンズ #1X	15	Q電磁石レンズ #5Y
7	Q電磁石レンズ #1Y	16	Q電磁石レンズ #6X
8	Q電磁石レンズ #2X	17	Q電磁石レンズ #6Y
9	Q電磁石レンズ #2Y	18	Q電磁石レンズ #7X
10	Q電磁石レンズ #3X	19	Q電磁石レンズ #7Y
11	Q電磁石レンズ #3Y	20	Q電磁石レンズ #8X
12	Q電磁石レンズ #4X	21	Q電磁石レンズ #8Y
13	Q電磁石レンズ #4Y	22	Q電磁石レンズ #9X
14	Q電磁石レンズ #5X	23	Q電磁石レンズ #9Y

Table 3.7 空調換気設備機器表(1)

記号	機 器 名 称	機 器 仕 様	設 置 場 所	台 数	電 源
RF2-1 RF2-2	チリングユニット	形 式 空気熱源ヒートポンプ式 冷却能力 65,000 kcal/h 加熱能力 52,500 kcal/h 冷温水 水量 冷水 217リットル/min 温水 175リットル/min 圧 縮 機 容量制御 (9+15kw) 冷房 100-61-0% 暖房 100-39-0% ファンケルヒータ (0.12×2kw) 送 風 機 空気熱交換器用 (0.18×3kw)	屋 上	2	3-200
P14-1 P14-2	一次冷温水循環ポンプ 1 一次冷温水循環ポンプ 2	形 式 ラインポンプ (0.75kw) 40φ×217リットル/min×7m	屋 上	2	3-200
P15-1 P15-2	二次冷温水循環ポンプ 1 二次冷温水循環ポンプ 2	形 式 ラインポンプ (2.2kw) 65φ×395リットル/min×17m	屋 上	2	3-200
WT-1	水処理装置	用 途 防食およびスライム処理 タリ容量 100リットル 薬注ポンプ MAX 40リットル/min(0.025kw)	屋 上	1	1-200
WCT-2	蓄熱槽	形 式 FRP製組立式(耐熱用PVC)複合板構造 外形寸法 1,000×4,000×1,000H 常時使用温度 7~45℃	屋 上	1	
AC7	外気処理系統空調機	形 式 立形エアハンドリングユニット 送 風 機 3,750m <sup>3</sup> /h(3.7kw),機外静圧 78mmAq 冷却能力 42,300 Kcal/h 加熱能力 34,900 Kcal/h コイル 冷温水コイル 6列 冷水量 141 l/min, 温水量 117 l/min 凍結防止ヒータ 電気ヒータ 5kw×2段 加湿器 高圧水スプレー 60リットル/h(0.12kw)	R F 室	1	3-200 3-200 1-200
AC8-1	ブースター室系統空調機No.1	型 式 立形エアハンドリングユニット 送 風 機 5,120m <sup>3</sup> /h(1.5kw),機外静圧 15mmAq 冷却能力 14,400 Kcal/h 加熱能力 4,000 Kcal/h コイル 冷温水コイル 4列 冷水量 48 l/min, 温水量 48 l/min	ブ-スター室	1	3-200
AC8-2	ブースター室系統空調機No.2	AC8-1に同じ 機外静圧 14mmAq	ブ-スター室	1	3-200
AC8-3	ブースター室系統空調機No.3	AC8-1に同じ 機外静圧 14mmAq	ブ-スター室	1	3-200
AC9-1	ターゲット室系統空調機No.1	型 式 立形エアハンドリングユニット 送 風 機 3,930m <sup>3</sup> /h(1.5kw),機外静圧 14mmAq 冷却能力 11,060 Kcal/h 加熱能力 2,930 Kcal/h コイル 冷温水コイル 4列 冷水量 37 l/min, 温水量 37 l/min	ターゲット室	1	3-200
AC9-2	ターゲット室系統空調機No.2	AC9-1に同じ 機外静圧 13 mmAq	ターゲット室	1	3-200
AC9-3	ターゲット室系統空調機No.3	AC9-1に同じ 機外静圧 19 mmAq	ターゲット室	1	3-200
PC5	R F 室系統空調機	形 式 空気熱源ヒートポンプ式(床置タイプ) 冷房能力 31,500 kcal/h 暖房能力 12,070 kcal/h 室内機 圧縮機 容量制御100-50-0%(5.5x2kw) 送風機 8,400m <sup>3</sup> /h (2.2kw) 機外静圧 20mmAq ファンケルヒータ 0.03×2kw 室外機 送風機(0.19×2kw)	R F 室 屋 上	1	3-200



Table 3.8 空調換気設備機器表(2)

記号	機 器 名 称	機 器 仕 様	設 置 場 所	台 数	電 源
PC6	リニア準備室系統空調機	形 式 空気熱源ヒートポンプ式(床置直吹) 冷房能力 16,000 kcal/h 暖房能力 14,000 kcal/h 室内機 送風機 4,200m <sup>3</sup> /h (0.75kw) 圧縮機 5.5kw ファンモーター 0.05kw 補助ヒータ 5.1kw 室外機 送風機 0.14+0.18kw	リニア準備室 屋上	1	3-200
PC7	化学室系統空調機	形 式 空気熱源ヒートポンプ式(床置直吹) 冷房能力 6,300 kcal/h 暖房能力 4,330 kcal/h 室内機 送風機 1,560~1,020m <sup>3</sup> /h 補助ヒータ 2.1kw 室外機 圧縮機 2.2kw 送風機 0.095kw	化学室 屋上	1	3-200
PC8	回路室系統空調機	形 式 空気熱源ヒートポンプ式(床置直吹) 冷房能力 9,000 kcal/h 暖房能力 4,800 kcal/h 室内機 送風機 2,100~1,380m <sup>3</sup> /h 0.045×2 補助ヒータ 2.1kw 室外機 圧縮機 3.0kw 送風機 0.095kw, 0.075kw	回路室 屋上	1	3-200
SF1-1 SF1-2 SF1-3	ヘリウム機械室系統送風機	形 式 有圧扇 送風機 600φx4,500m <sup>3</sup> /hx15mmAq (0.75kw) フィルタ 粗塵フィルタ 610x610x50t フード 600x600(SUS製)防虫網付き	ヘリウム機械室	3	3-200
WF-8	ブースター室系統排風機	型 式 軸流ファン 排風機 1,400m <sup>3</sup> /hx25mmAq (0.28kw)	屋上	1	3-200
WF-9	便所系統排風機	型 式 軸流ファン 排風機 550m <sup>3</sup> /hx5mmAq (0.04kw)	男子便所	1	1-100
WF10-1 WF10-2	ヘリウム機械室系統排風機	型 式 有圧扇 排風機 600φx6,500m <sup>3</sup> /hx10mmAq (0.75kw)	ヘリウム機械室	2	3-200
AF-1	外気処理系統エアフィルタ	フィルタ 処理風量 3,750m <sup>3</sup> /h 粗塵フィルタ 610x610x50tx2	RF室	1	
		除塩フィルタ 処理風量 3,750m <sup>3</sup> /h 中性能フィルタ 610x610x915tx1	RF室	1	
P-22-1 P-22-2	排水槽No.6排水ポンプNo.1 No.2	形 式 水中ポンプ (11kw) 100φx1.8m <sup>3</sup> /minx15m 用 途 雨水排水 付 属 品 着脱装置 水槽深さ 1,500H	B1階屋外	2	3-400
P-23	排水槽No.7排水ポンプ	形 式 水中ポンプ (1.5kw) 65φx200リットル/minx12m 用 途 雑排水 付 属 品 着脱装置 水槽深さ 2,600H	B1階屋外	1	3-200
P-24	排水槽No.8排水ポンプ	形 式 水中ポンプ (1.5kw) 65φx160リットル/minx12m 用 途 汚水排水 付 属 品 着脱装置 水槽深さ 1,960H	B1階屋外	1	3-200

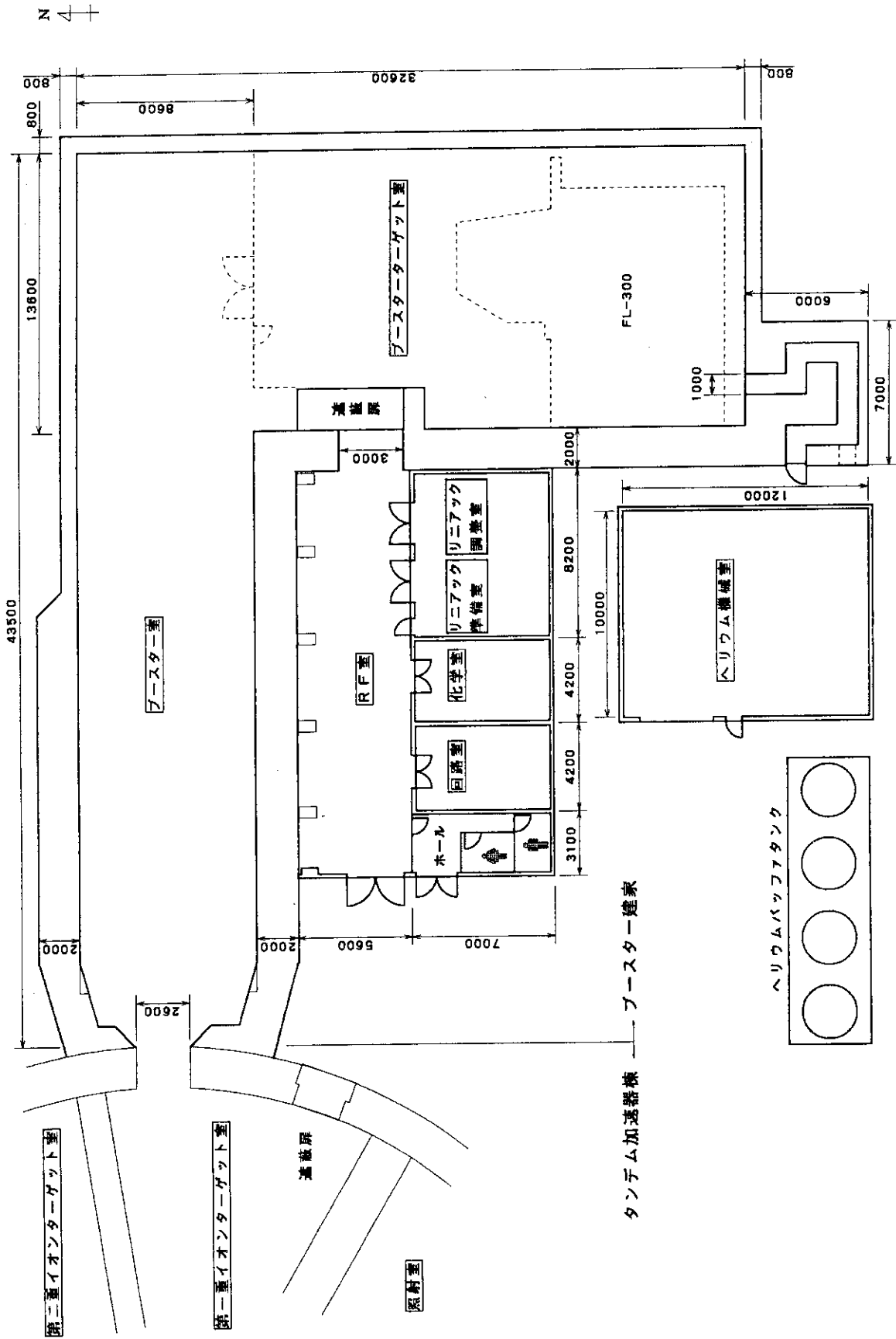


Fig. 3.1 ブースター建家平面図

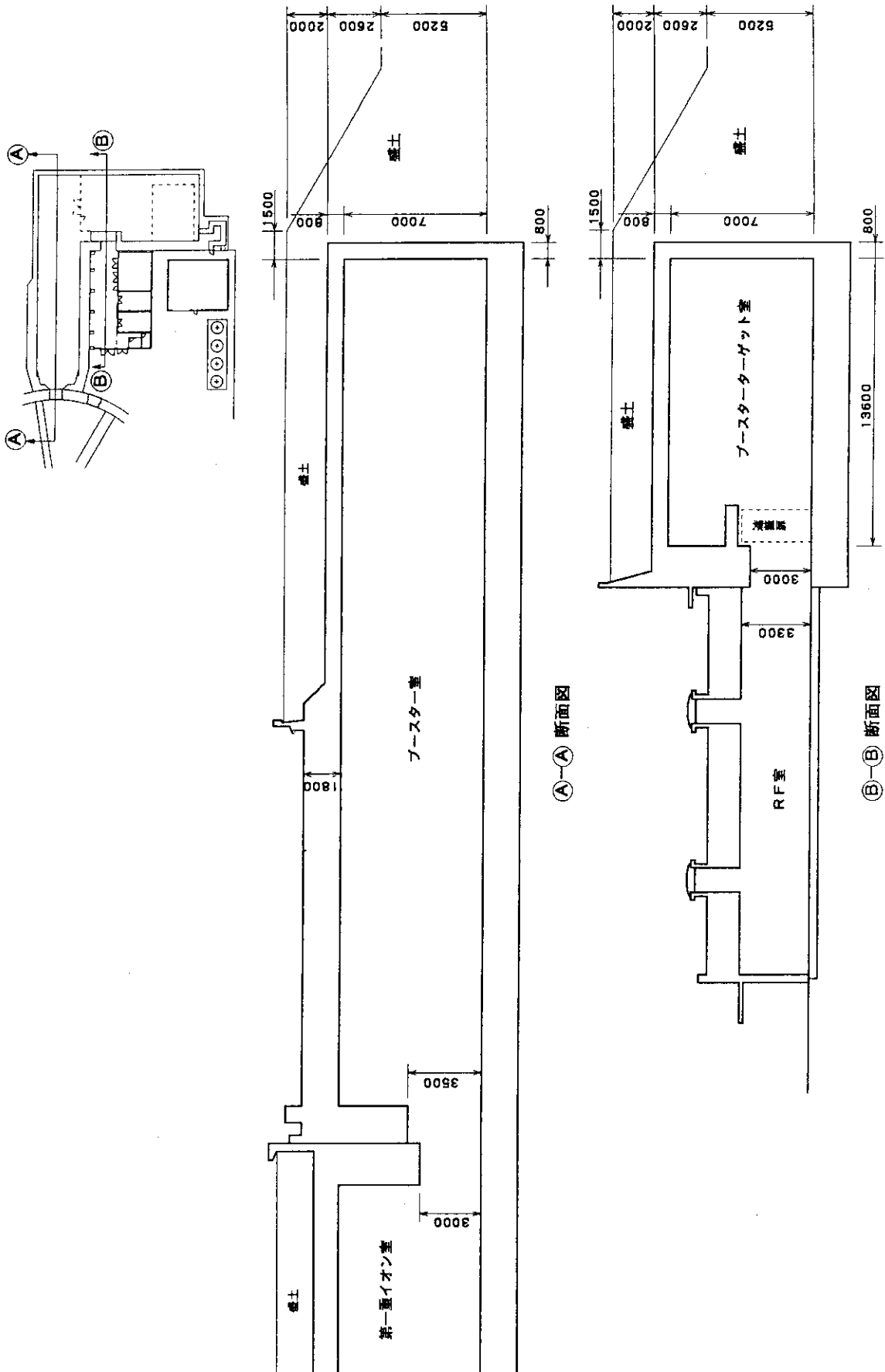


Fig. 3.2 プロトン加速器建家東西断面図

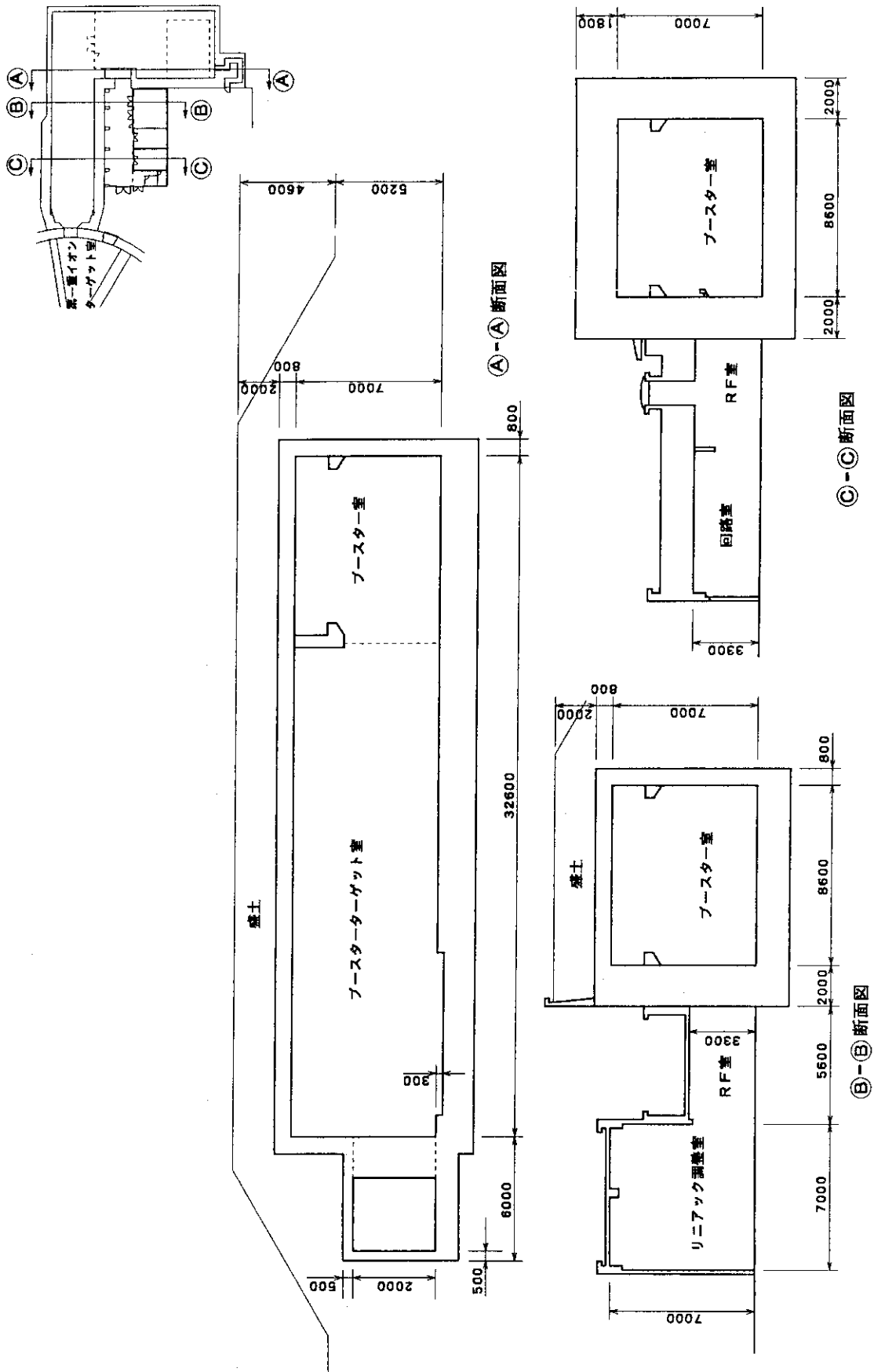


Fig. 3.3 ブースター建家南北断面図

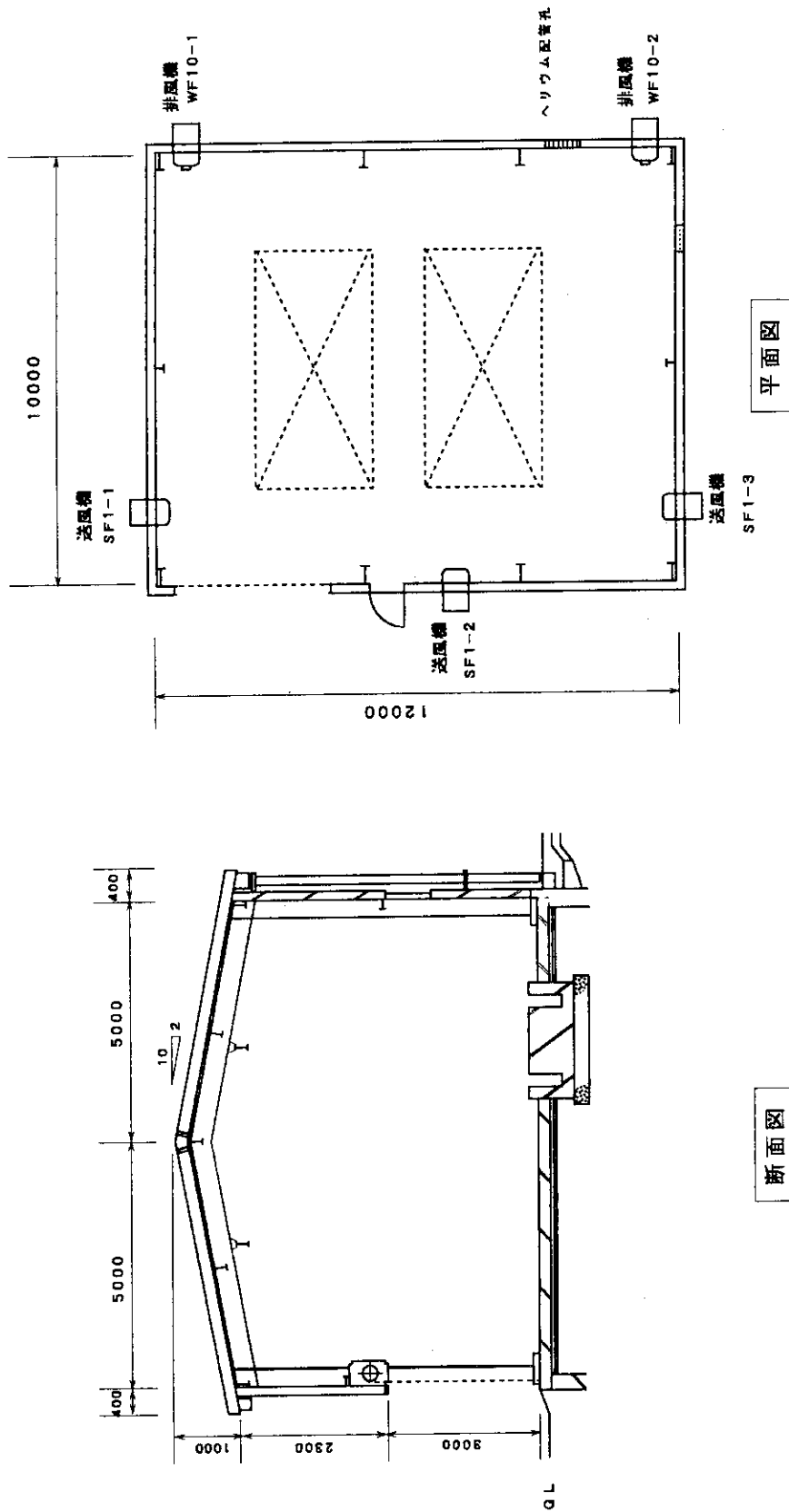


Fig. 3.4 ヘリウム機械室図

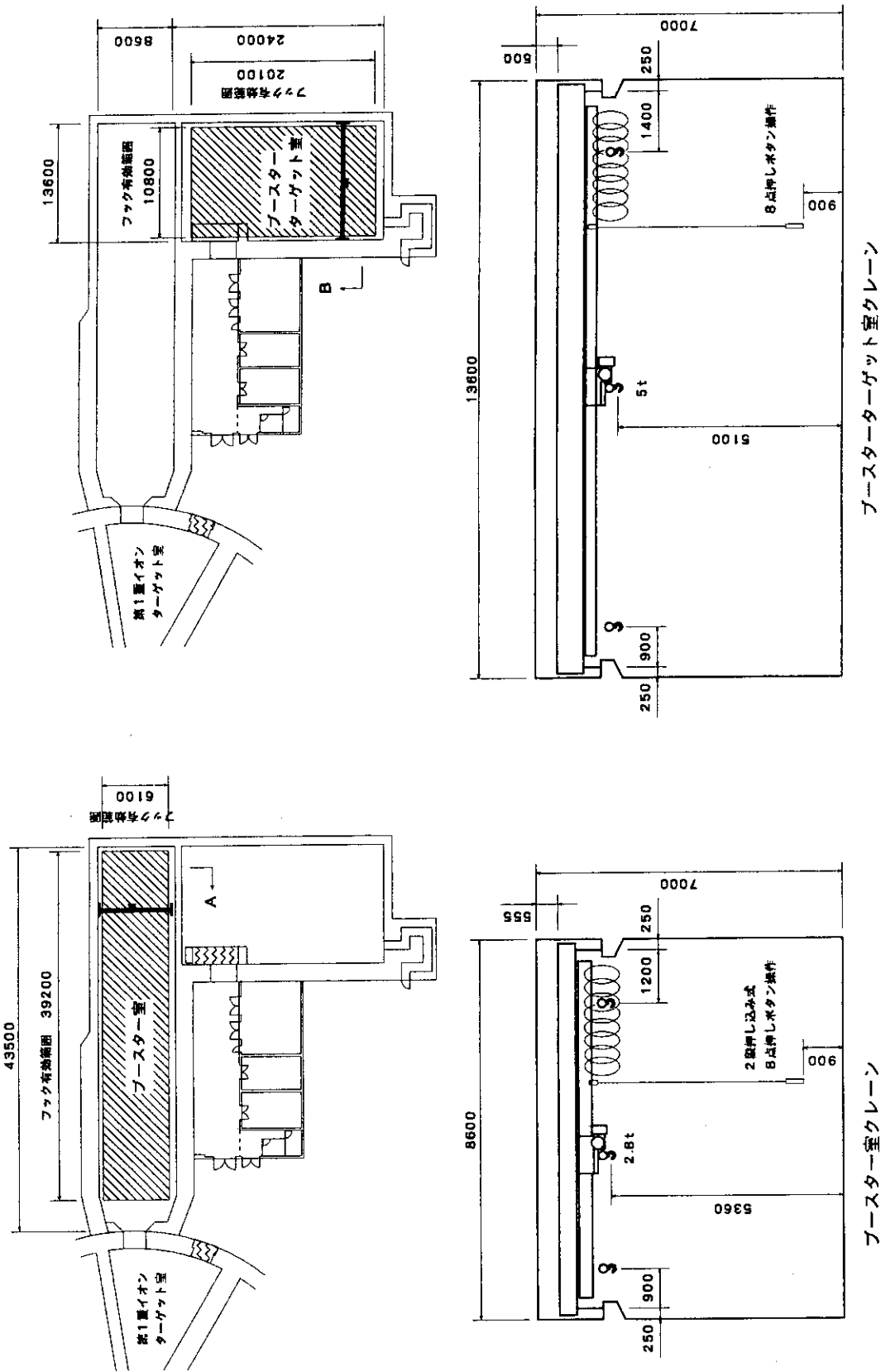


Fig. 3.5 天井クレーン配置図

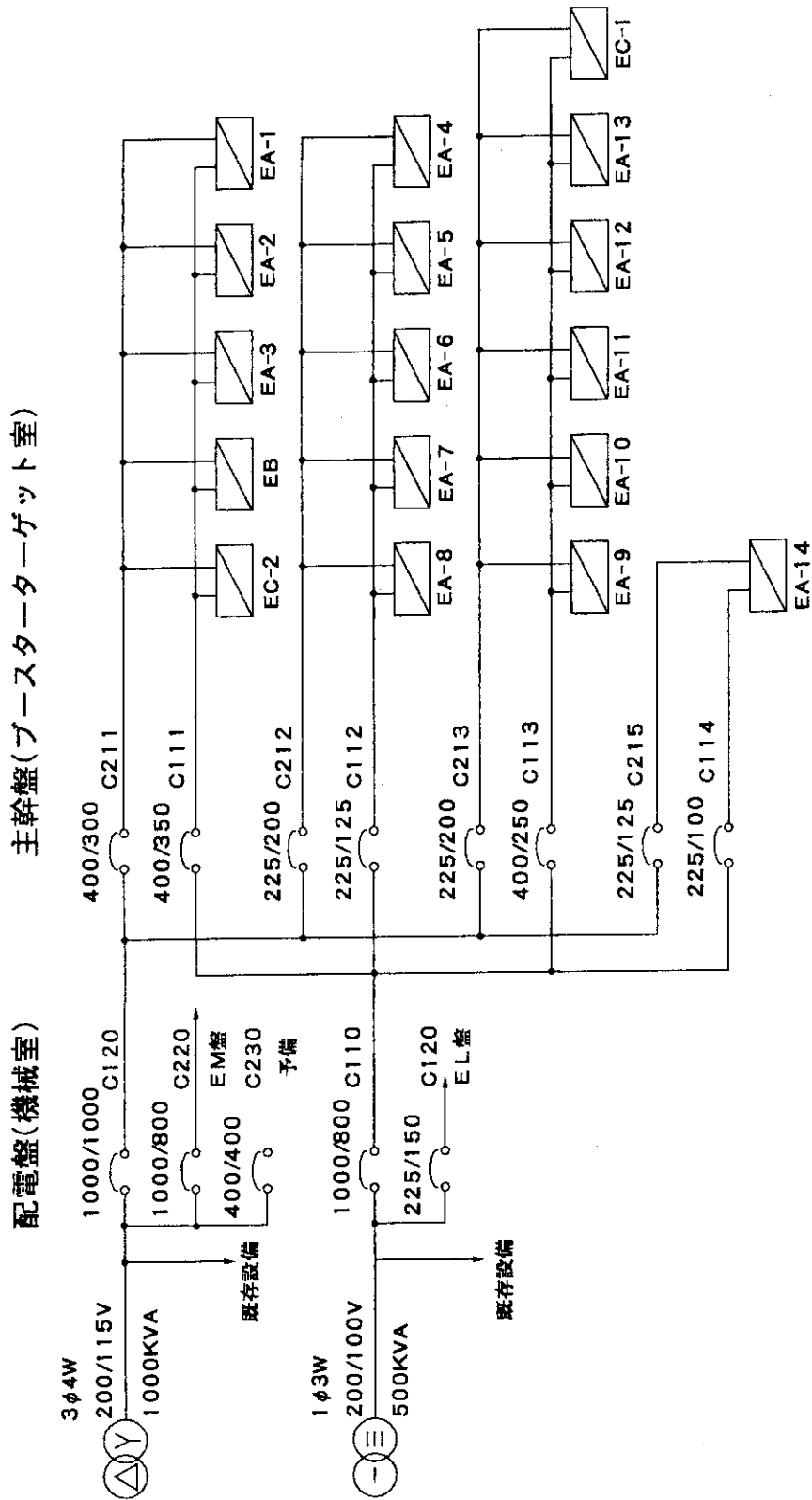


Fig. 3. 6a 電力系統図一

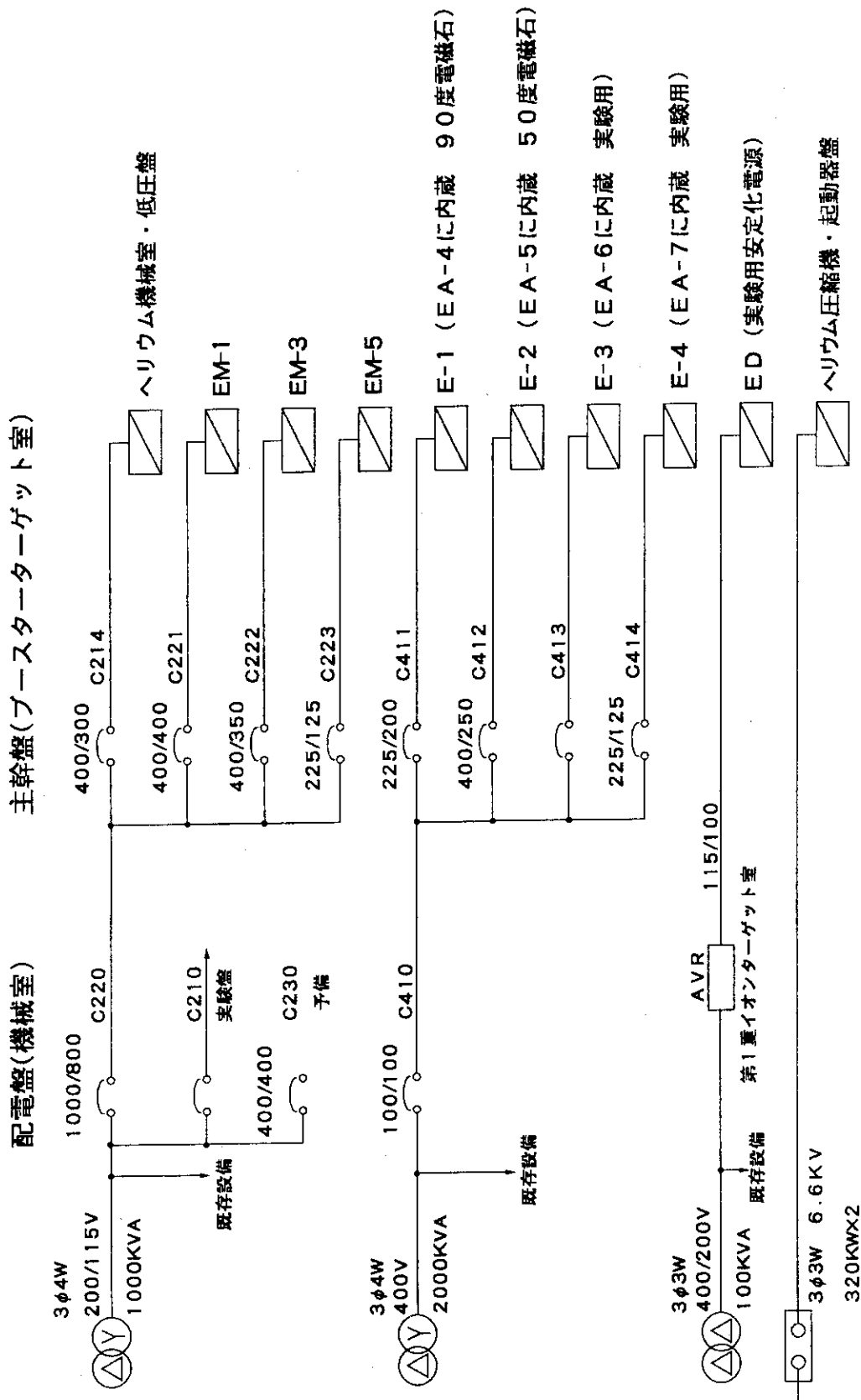


Fig. 3.6b 電力系統図-2



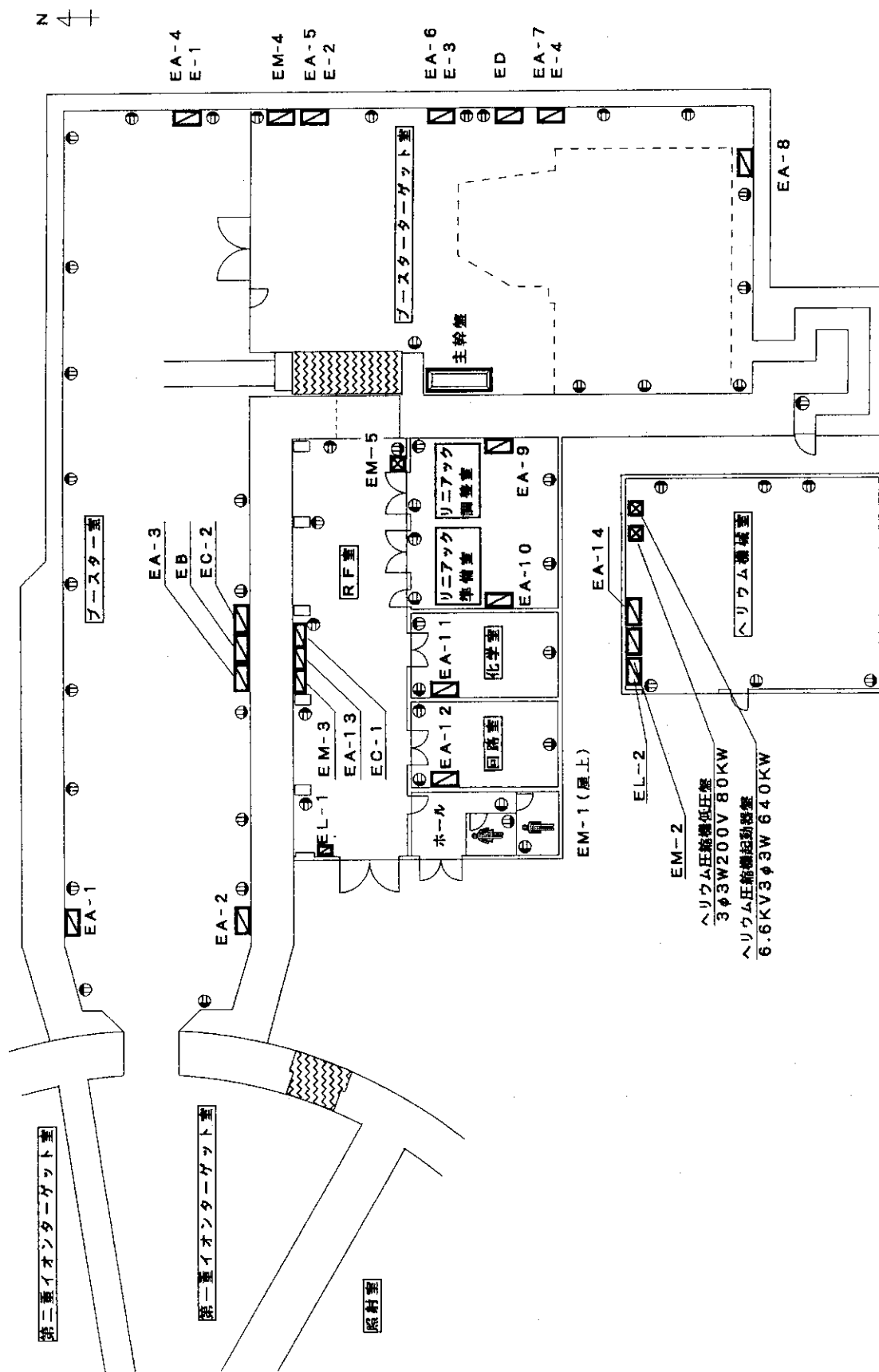


Fig. 3.7 実験盤等配置図

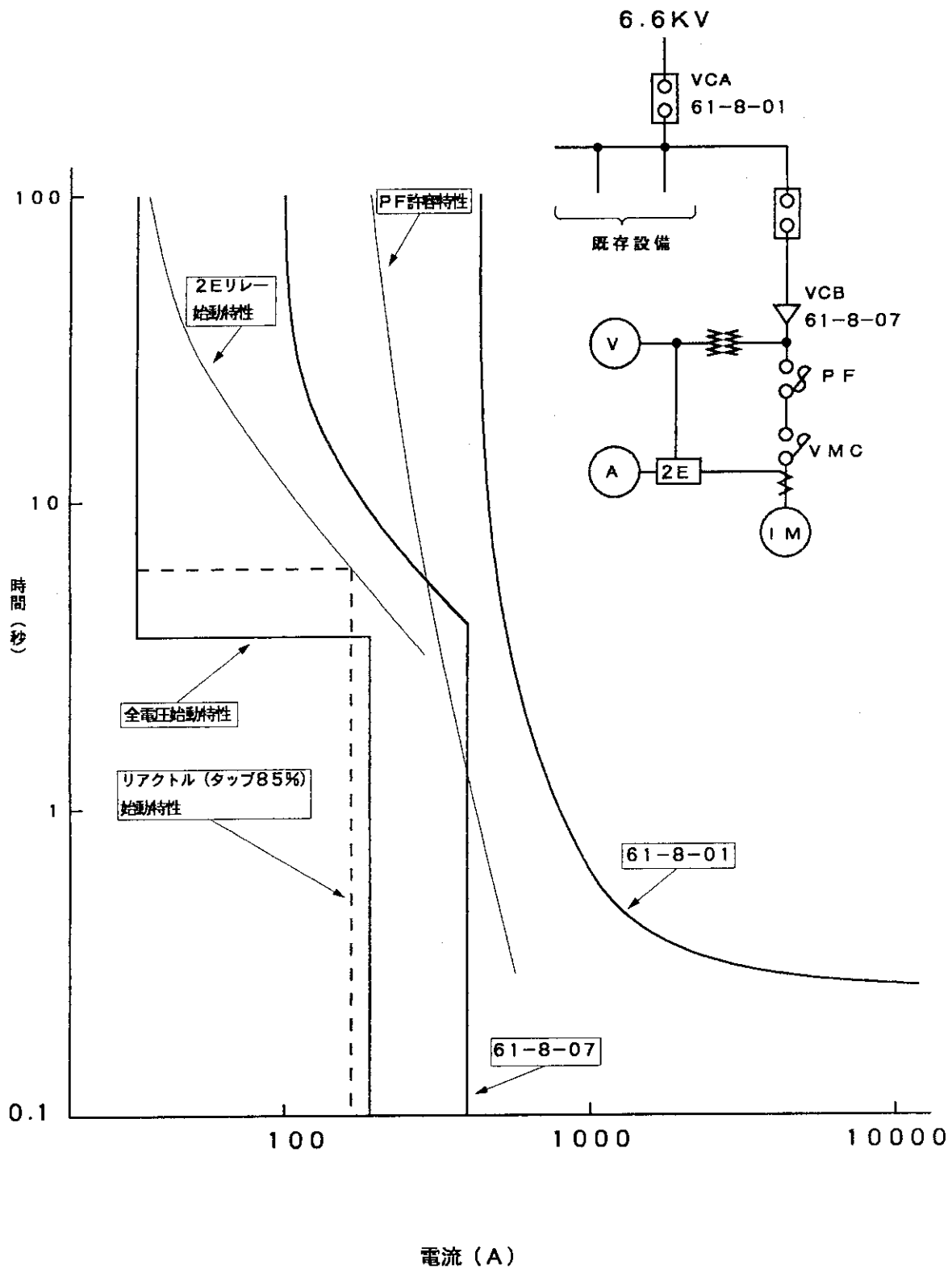


Fig. 3.8 保護協調特性図

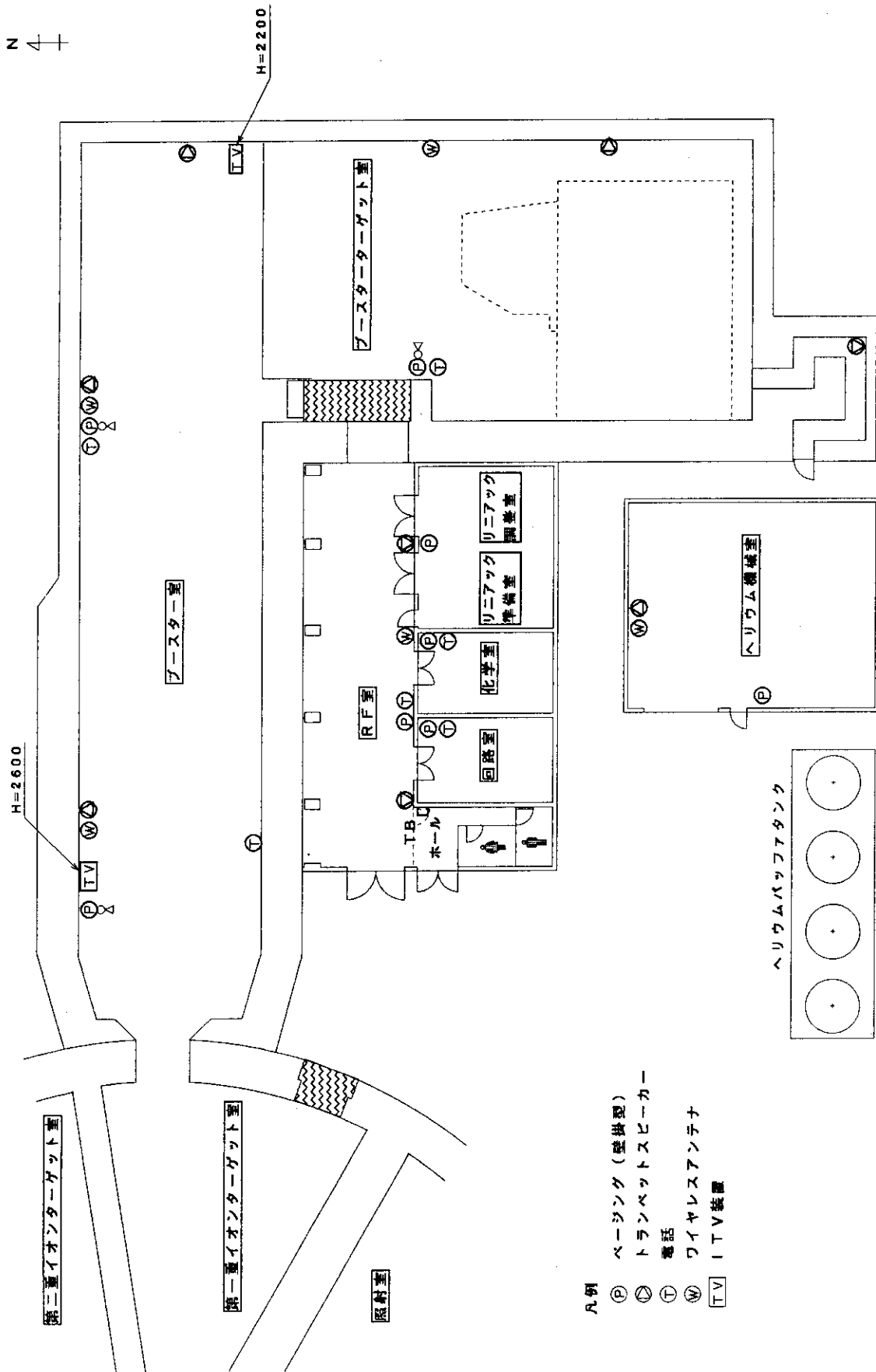


Fig. 3.9 放送設備

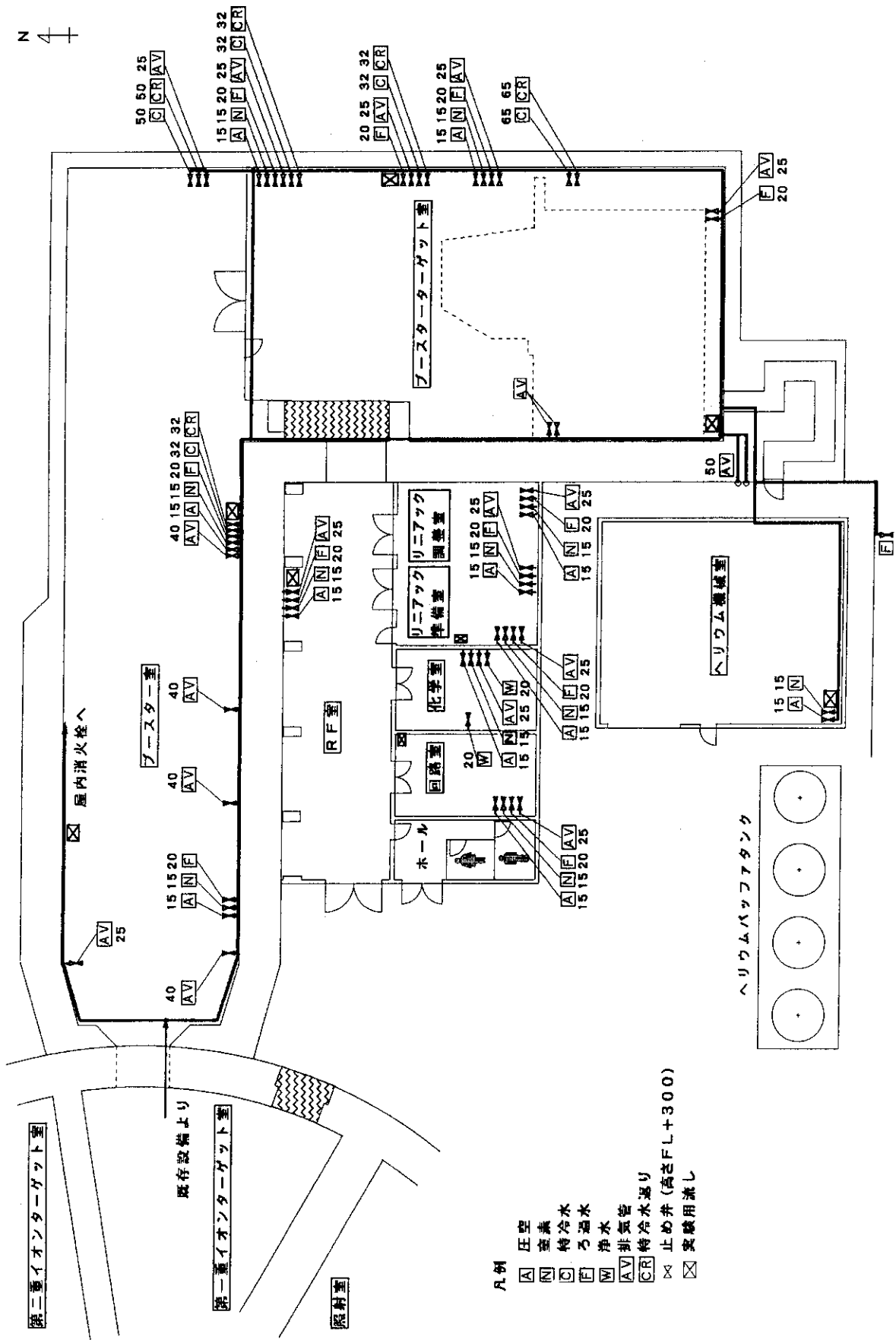


Fig. 3.10 圧空窒素・給排水その他バルブ配置図

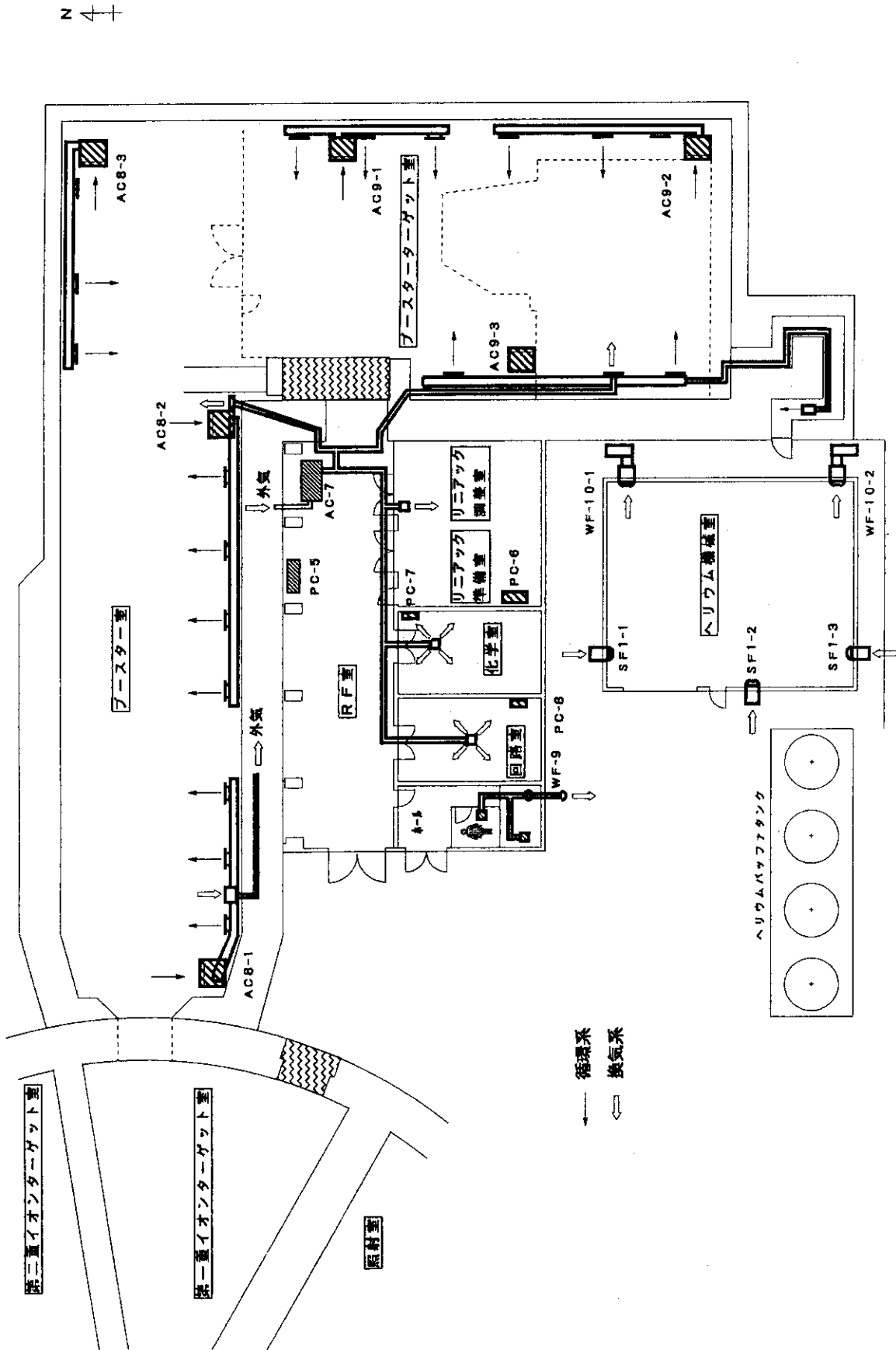


Fig. 3.11 プースター-建家空調機器配置図

## 4. 安全系について

### 4. 1 はじめに

本章はブースターに係る安全系として放射線被ばく防止、地震、停電、火災および酸素欠乏等に対する安全系について記述する。ブースター設置はタンデム加速器の炭素イオン以上の元素の加速エネルギーの向上を目的とした改造であり、放射線発生能力は増加しないことからタンデム加速器の安全系の設計基準をそのまま適用した。ただし、障害防止法に関する変更はタンデム加速器設置当時に比べ改正点も多く、今回の変更を機会にタンデム加速器と建家全体にわたる変更手続きも併せ行った。

### 4. 2 施設の安全設計

#### 4. 2. 1 放射線被ばく防止に関する安全設計

##### (1) 概要

ブースター本体及び実験に用いる装置は、充分厚いコンクリートでしゃへいした。また、超電導空洞に電圧を印加している場合、あるいはイオンビームを加速中に、不用意な入室による被ばくを防止するためインターロックを設置した。機器の配置をFig. 4.1 に示す。

コンクリートしゃへい体、しゃへい扉及び迷路は管理区域の境界における線量当量を基準値以下にする能力を備えている。管理区域をFig. 4.2 に示す。

##### (2) ブースターとタンデム加速器を直列で使用する場合の線量当量の評価

ブースターは独立した入射器を備えてないため、タンデム加速器から得られるイオンビームをブースターに入射して使用する場合の評価のみを行った。

##### a. 計算に用いる前提条件

##### ① 発生する放射線の種類と強度並びにその発生源

ブースターで加速されたイオンが直接入射する箇所はファラデーカップ及び実験装置であり、その材質はタンタル、ステンレススチール (Fe-Ni-Crの合金) である。これらの箇所では、入射ビームの100%が反応に寄与する。

加速イオンが物質と相互作用すると中性子及び $\gamma$ 線が発生する。標的物質の原子番号が13～82の範囲でかつ、加速イオンの核子当たりのエネルギーが等しければ反応により発生する中性子量はほぼ等しい。また、発生量は加速イオンの核子当たりのエネルギーが高い程多い。ブースターでは炭素より軽い元素は加速しないので、核子当たりのエネルギー及び得られる電流値が最大である炭素イオンビームと標的物質(鉄)との反応により発生する中性子及び $\gamma$ 線について評価する。

## ② 計算に用いる中性子発生量とエネルギースペクトル

100MeV以上に加速された重イオンと物質との反応により発生する中性子量とそのエネルギースペクトルを実験で求めた報告はない。ORNLの H.W.Bertiniらは、エネルギー 192, 500, 700, 900MeVの炭素イオンが鉄と反応したときに発生する中性子の微分断面積をモンテカルロ法により求めている[1]。しかし、直線加速器で加速できる最大エネルギー 250MeVでの微分断面積は与えられていない。そこで、192, 500, 700MeVのデータから、250MeVに相当する微分断面積を内挿法により求めて用いた。

③ 計算に用いる $\gamma$ 線の発生量とそのエネルギー

加速イオンがファラデーカップやターゲット物質と衝突して発生する $\gamma$ 線は、加速イオンと物質の原子核との間の原子核反応によって生じるものであり、エネルギーの低いものが多い。1回の衝突で出る $\gamma$ 線の数、原子核反応における $\gamma$ 線の多重度測定の結果から推定できる。重イオンによる原子核反応の場合、 $\gamma$ 線の多重度はおおくて 20程度で、その平均エネルギーは 1MeVである。一方、中性子の多重度はエネルギーが高いときに 5~7程度で、エネルギーが低くなると小さくなる。以上の結果から、核反応に伴って放射される $\gamma$ 線の発生量は、中性子発生量の 10倍、その実効エネルギーは 1MeVとした。

## ④ 放射線発生源の位置及び評価点

ブースター建家における放射線発生源は、ブースターで最大エネルギーに達した後のファラデーカップ及び実験装置とする。最大エネルギーに達する以前でのブースター、ビームライン、スリット等による損失時における発生量は、加速されたイオンのエネルギーが低いため評価から除いた。

Fig. 4.3 に放射線発生源の位置及び管理区域境界での評価点を示す。また、迷路の一部は液体ヘリウムの配管等が通る開口部があるため、評価点は迷路出口と配管の出口の2ヶ所とした。

## b. シャヘイ計算

## ① 中性子の壁による減衰

加速イオンと物質の相互作用で発生した中性子がシャヘイ壁等に入射し減衰した後の中性子線及びシャヘイ体内で発生した2次 $\gamma$ 線を合わせて中性子線量当量率 $H_n$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )を求めた。ただし、コンクリートと土の複合体に対してはコンクリートと標準土の組成がほぼ同じなのでシャヘイ体の厚さ $t = t_1 + t_2 / 2.3$ とした ( $t_1$ : コンクリートの厚み,  $t_2$ : 土の厚み)。

## ② 中性子の迷路による減衰

迷路における漏えい中性子線量当量率 $H_n$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )は、Teschの経験式[2]から求めた。

## ③ 中空直円筒ダクトの放射線(中性子線)ストリーミング

長さ $l$  (m) 半径 $r$  (m)の円筒ダクトに対しダクト出口の放射線束は直視成分が無いので、1回散乱のみを考慮して減衰率 $g_n$ を求めた。また、高速中性子の場合は壁透過の放射線束( $\phi_p$ )も考慮した。

④  $\gamma$ 線の壁による減衰

シャヘイ体透過後の $\gamma$ 線の線量当量率 $H_\gamma$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )を求めた。

⑤  $\gamma$ 線の迷路による減衰

直角迷路における漏えい $\gamma$ 線線量当量率 $H_\gamma$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )を求めた。

⑥ 中空円筒ダクトの放射線（ $\gamma$ 線）ストリーミング

上記③と同様に、 $\gamma$ 線の減衰率  $g_\gamma$  を求めた。

⑦ スカイシャインによる線量当量

中性子発生源から水平距離  $r$  (m) 離れた点における中性子スカイシャインによる線量当量率  $H_n$  ( $\mu\text{Sv/h}$ ) を求めた。ここで、中性子束密度  $\phi(r)$  を求めるには、Rindiらの経験式[3]を用いた。

c. 計算に用いる数値

1センチメートル線量当量率への換算には、科学技術庁告示第15号（昭和63年）別表4（ $\gamma$ 線）及び、別表5（中性子線）を用いた。ただし、中性子に係る線量当量の評価には記載値を2倍した値を用いる。ここでは、しゃへい体透過後の中性子エネルギーの評価が困難であるため、透過前のエネルギーを保存しているとした。また、20MeV以上の中性子に対しては換算値が与えられていないので20MeVの換算値を用いた。

d. 計算結果

① 管理区域境界における線量当量

管理区域境界における線量当量は、 $\gamma$ 線及び中性子線について評価し線量当量率を求めた。各評価点における計算結果をTable 4.1 に示す。

Table4.1 管理区域境界における人が常時立ち入る場所での線量当量率

放射線発生源	評価点	線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
		中性子線	$\gamma$ 線	合計
I	A	$3.1 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-3}$
	F	$1.7 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-2}$
II	B	0.82	$2.0 \times 10^{-7}$	0.82
	C	0.13	$8.3 \times 10^{-8}$	0.13

迷路出口及び迷路に設置したダクト出口における線量当量率をTable 4.2 に示す。計算は放射線発生源をIII点（Fig. 4.3a 参照）とし迷路入口における線量当量率を求める。次に迷路及びダクトによる減衰を考慮し計算した。

迷路入口での線量当量は、中性子線： $1.17 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$   
 $\gamma$ 線： $3.3 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$ である。

Table 4.2 迷路出口及びダクト出口における線量当量率

放射線発生源	評価点	線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
		中性子線	$\gamma$ 線	合計
III	D	1.74	$8.0 \times 10^{-4}$	1.74
	E	0.82	$1.0 \times 10^{-5}$	0.82



各評価点における線量当量は評価時間を1週 48時間とするとTable 4.3 に示す値となる。

Table 4.3 各評価点における線量当量

評価点	線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	評価時間 (h)	線量当量 ( $\mu\text{Sv}$ )
A	$4.8 \times 10^{-3}$	48	0.288
B	0.82	48	78.8
C	0.13	48	12.4
D	1.74	48	167.0
E	0.82	48	78.8
F	$1.7 \times 10^{-2}$	48	1.64

この表から明らかなように設計基準は管理区域境界における線量当量は、いずれの地点でも法令に定める1週間あたりの線量当量限度  $300 \mu\text{Sv}$  を十分下回っている。

#### ② 事業所境界における線量当量

事業所境界における線量当量は、スカイシャインによる遠方への影響の大きい中性子について評価し、 $\gamma$ 線のスカイシャインは管理区域境界での線量当量率が充分低いため評価しない。直達放射線の影響は、この施設は地下構造であり事業所境界までの距離が400mと離れているため評価しなかった。事業所境界における線量当量率を評価したところ、 $1.5 \times 10^{-7} \mu\text{Sv/h}$  となった。ブースターから一番近い境界である400m離れた地点での3月間の線量当量は、3月間を13週 = 91日 = 2,184時間とし、告示別表第5の値を2倍して評価すると  $6.6 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}$  であり、法令で定める事業所境界における3月間の線量当量限度  $250 \mu\text{Sv}$  を十分下回っている。

#### (3) 空気の放射化

ブースター室及びブースターターゲット室では、ファラデーカップあるいはターゲットと $^{12}\text{C}$ イオンの反応により生成する中性子と、室内の空気を構成する原子との反応により放射性核種が生成する。ここでは、空気の主要構成元素である窒素、酸素、及び微量に混在するアルゴンと中性子との反応により生成する核種、 $^{13}\text{N} : ^{14}\text{N} (n, 2n) ^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O} : ^{16}\text{O} (n, 2n) ^{15}\text{O}$ 、 $^{41}\text{Ar} : ^{40}\text{Ar} (n, \gamma) ^{41}\text{Ar}$  について空气中放射能濃度を評価した。ここで、上記二つの室内は空間がつながっており空気は一つの排気口から外へ排出されているため、室内の放射能濃度と排気中放射能濃度は等しくなる。

中性子が連続して発生している条件での空气中放射能濃度は、中性子発生量、空気構成元素の存在比、反応断面積等の計算から  $^{13}\text{N} : 2.0 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ 、 $^{15}\text{O} : 3.84 \times 10^{-5} \text{Bq/cm}^3$ 、 $^{41}\text{Ar} : 5.65 \times 10^{-5} \text{Bq/cm}^3$  の値が得られた。

計算で得られた各核種の空气中放射能濃度と排気中放射能濃度限度との比の和は0.507となり、法令で定められた濃度限度比を十分下回っている。

#### (4) 空洞電圧発生時のX線による線量当量の評価

作業者がブースターターゲット室及びブースター室に入室できるのは、加速器の運転を停止している場合である。ただし、「ブースター電圧発生中」においては、ブースターターゲット室に入室することがあるため、超電導空洞から発生する制動X線による作業者の線量当量を評価した。

##### a. 線源強度

実用的な加速空洞に対するX線発生量は、KEK（高エネルギー物理学研究所）で測定されている。それ[4,5]によれば、電場勾配 6MV/mのとき空洞（空洞半径 25.6cm）表面における照射線量率；Qは 20mR/hである。これを空洞の中心に点状線源があると仮定した場合、発生源から1mの地点での線量率 $Q_0$ は、1.32mR/h at 1mと見積もられる。

付設するブースターで用いる超電導空洞では、電場勾配は 5MV/mであり、電子エネルギー、電流密度ともに文献[4]の場合より小さく、上記値を上回ることはない。従ってこの値を採用した。

##### b. 発生点と評価点

電圧発生中に作業者が立ち入る可能性のある場所をFig. 4.3aのG点とした。X線発生源は#1～10までの加速ユニット及びデバンチャーである。なお、#8～10の加速ユニット及びデバンチャーには厚さ 2cmの鉛しゃへいを施した。

##### c. 計算

しゃへい体がある場合としゃへい体がない場合に分け、線源からr (cm)の点における照射線量率 $D_x$  (mR/h)を求め、1Rが $8.73 \times 10^{-3}$ Gyに相当するという関係から空気吸収線量率に変換し、告示第15号別表第4の線量当量とガンマ線のエネルギーの関係を用い1cm線量当量率を求めた。ここで、1cm線量当量率への換算には、告示第15号別表第4の値の最大値 1.74を採用した。

##### d. 計算結果

各線源からの寄与を合計すると $9.33 \times 10^{-2}$ mR/hとなり、 $1.42 \mu\text{Sv/h}$ に相当する。

1週間当たりの線量当量は、作業時間を48時間とすると、 $1.42 \times 48 = 68.2 \mu\text{Sv}$ となり、管理区域内の人が常時立ち入る場所における1週間当たりの線量当量限度 1mSvを十分下回る結果を得た。

## 4. 2. 2 地震に対する安全設計

ブースター建家はCクラスの耐震設計とするため機器類の固定は以下の方式とした。

屋内の加速ユニット、分析電磁石等は、アンカーボルトで床面に固定する。アンカーボルトは、Cクラスの耐震性を想定し、それに耐えられる本数、太さを選択して使用する。

屋外に設置するヘリウムバッファタンクは、鉄筋コンクリートの基礎台にアンカーボルトで固定する。

なお、震度4程度以上（加速度 30Gal以上）の地震が発生した場合、地震インターロックに

よりイオンビームの加速は自動的に停止する。これにより仮に地震により加速ユニットが壊れたとしても、放射線等の影響が周辺環境に及ぶことはない。

#### 4. 2. 3 停電に対する安全設計

ブースターの運転中に停電が発生した場合、各電源は安全に停止する。イオンビームの加速は電源の停止と同時に安全に停止するため、放射線等の影響が周辺環境に及ぶことはない。

また、停電によりヘリウム冷却系及び真空排気系も停止するが、これらは安全弁等の自動操作弁が作動し安全な状態を保持することができるので、爆発等の危険性はない。

#### 4. 2. 4 火災に対する安全設計

ブースター建家の主要構造部等は耐火構造または不燃材料で造られているので、火災が発生しても倒壊するおそれはない。

必要箇所に煙感知器を設置し、火災が発生した場合はタンDEM加速器建家玄関にある火災報知器盤を経由してブースター建家内及びタンDEM加速器建家内に警報が吹鳴され、それと同時に中央警備詰所に通報される。可能な限り初期消火が行えるように、必要箇所に消火器及び消火栓を設置した。非常用設備の配置をFig. 4.4 に示す。

### 4.3 安全系設備

#### 4. 3. 1 放射線インターロック

ブースターのインターロックは、加速器の運転によって放射線の発生する部屋の出入口ドアを「開」にすると加速器の運転が自動停止する方式とした。また、操作面では2段アクションの過程を経ないと加速器の運転が開始できないようにより安全性に配慮してある。この方式は、タンDEM加速器と同様にタンDEM棟建家内では統一した放射線防護管理とした。ブースターの運転形態には、加速空洞に「高周波電圧印加」と、これに加え「ビーム加速」に分けられ、これらに対応したふたつのインターロックモードがある。前者は、タンDEM加速器の電圧発生と区別する意味で『ブースター電圧発生』モードとしてあり、操作・監視は、RF室に設置されている操作・監視盤において行い、将来的なことが考慮されタンDEM制御室からの遠隔操作も可能なように作られている。後者は、タンDEM加速器の『ビーム発生』モードに含まれ、ブースター室およびブースターターゲット室を第一重イオンターゲット室が拡張されたものとして扱っており、タンDEM制御室のインターロック制御盤で制御され、タンDEM制御コンソールCRTで操作される。下記に両モードの概略を示す。

A. 『ブースター電圧発生』モード：高周波電圧印加用RFアンプの電源ON

・条件：第1重イオンターゲット室、ブースター室の入室禁止

- ・操作：①第1操作スイッチON：高周波電圧印加予告（1分間第2操作強制禁止）
- ②第2操作スイッチON：高周波電圧印加可能
- ・インターロックが作動すると：高周波電圧印加用RFアンプの電源遮断

Fig. 4.5 に『ブースター電圧発生』モードのフローチャートを示す。

B. 『ビーム発生』モード：ブースターにビームを入射

- ・条件：上記Aの規制に加えブースターターゲット室の入室禁止
- ・操作：①第1操作：ファラデーカップ（FC 11-1，FC 01-1）OUT  
（ファラデーカップは強制的にINになり1分間OUT不可）
- ②第2操作：ファラデーカップ（FC 11-1，FC 01-1）OUT（ビーム加速）

- ・インターロックが作動すると：イオンビームは、タンデム加速器入射前の段階で遮断

両モードともタンデム制御室およびRF室において加速器の運転状態、ドアの開閉状態等の監視が出来る監視盤が設けられている。なお、タンデム制御室の監視盤は既存監視盤が増設加工されており、従前と同様な管理が行われる。また、入室が禁止される部屋のドア付近にはそれぞれ第1操作で起動する表示灯が設置され、室内には回転灯および運転開始時に自動放送が行われる設備が設けられている。

#### 4. 3. 2 放射線エリアモニター

中性子線およびガンマー線エリアモニターを1セットとした放射線エリアモニターをブースター室、ブースターターゲット室、RF室の3ヶ所に設置した。放射線量測定回路系は既存モニターシステムと同一の管理方式とするため、技術部エレクトロニクス課仕様の回路系で構成し、保健物理部線量計測課および放射線管理第2課の協力を得て設置した。線量表示、警報制御、記録計等の機器はタンデム棟制御室の既存の放射線監視盤を改造して盤内に組み込まれている。なお、RF室に設置されたセットについては、タンデム棟制御室の既存セットが移設されている。放射線エリアモニター回路系統図をFig. 4.6 に示す。

#### 4. 3. 3 酸素濃度モニター

超電導ブースターでは、加速空洞の冷却用に多量の液体ヘリウムが使用される。このため、地震等によるヘリウム配管系での洩れによる酸欠事故防止のため、増築棟の各区画毎の4ヶ所に酸素濃度検出器を設置した。酸素濃度の監視は、タンデム棟制御室とRF室に設置された酸素濃度計で行い、警報設定値（酸素濃度 18%）以下になると発報し、異常を知らせるようになっている。また、各検出現場では、警報音およびランプ表示される設備が設けられている。なお、制御室の監視盤には、タンデム加速器用（SF<sub>6</sub>ガス漏洩監視）の酸素濃度計と合わせて集中監視できるように作られている。Fig. 4.7 に酸素濃度モニター系統図を示す。

#### 4. 3. 4 テレビモニター設備

ブースター室およびブースターターゲット室の天井近くにテレビカメラを設置し、室内の状況が監視できるようになっている。これは、ブースター運転中に放射線インターロックによって該当する室内の出入りが禁止されるため、タンデム棟制御室およびRF室において安全を確認できるようにしたもので、カメラは遠隔操作できるようになっている。遠隔操作の信号は、タンデム棟の既存設備と同様に1本の同軸ケーブルに映像信号とカメラ制御信号を重畳・分離する方式を採用しているため、既存のモニターシステムで統一的に管理できる。

#### 4. 4 変更許可手続き等

##### 4. 4. 1 放射性同位元素等の許可使用に係る変更許可申請

###### (1) 概要

ブースターの設置工事にあたり、前項4. 2. 1) (2)を骨子とした放射性同位元素等の許可使用に係る変更許可申請(以下「許可申請」という。)を障害防止法第10条第2項の規定に基づき科学技術庁に提出した。今回の場合、既存タンデム加速器との関連もあり手続きは複雑化したため、監督官庁と事前の打ち合わせを十分行った。この結果、法改正によるタンデム加速器の線量当量の見直しに時間がかかるため変更手続きは2回に分けることにした。

第1回目は、ブースター建家の建設開始に伴い既存第一重イオンターゲット室の壁に打ち抜き穴を開けるため、放射線発生装置の使用場所及び密封された放射線同位元素の使用場所を廃止した。これは壁打ち抜き工事の際、第一重イオンターゲット室を管理区域から外しておいた方が都合が良いためにとられた措置である。具体的には、スイッチングマグネットの出口においてビームラインH3, H4, H5との接続ダクトを撤去し、マグネット出口にタンタルを内張りしたステンレス製のビームダンプを設置し、その外側に30cmの鉄しゃへいを施した。また、ビームラインシールドは機械的に固定した。この措置により管理区域境界における線量当量の基準を下回ることができた。(詳細については「許可申請(別添書類)」平成3年1月16日原研21第3号を参照のこと)

第2回目は、メインとなるブースターの設置に係る許可申請である。ここではタンデム加速器新設の後にあった障害防止法改正のため線量当量の評価を全て見直し申請書を作成した。以下にブースターに関する部分の概略を述べる。(計算式等の詳細については「許可申請(別添書類)」平成5年8月30日原研21第86号を参照のこと)。

###### (2) 変更の内容

- a. タンデム加速器建家における、第一重イオンターゲット室について、放射線発生装置の使用場所に設定する。
- b. タンデム加速器の使用目的に、『直線加速器のイオンビーム入射器』を追加する。

c. ブースター建家において、加速装置を設置し、加速器室及びターゲット室を放射線発生装置の使用場所に設定する。

注) ブースターは学術用語で線形加速器と呼ばれる形式に属するが、障害防止法施行令第2条(4)に直線加速器という名称で規定されているため許可申請では直線加速器とした。また、別名ブースターとも定義してあるのでブースターといっても差し支えはない。

#### 4. 4. 2 放射線装置室等設置変更届

放射線装置室等設置変更届(以下「変更届」という。)は、前項4. 2. 1)(3)を骨子としたものを労働安全衛生法 電離放射線障害防止規則第61条第3項に基づき平成4年11月13日水戸労働基準監督署(労働省)に提出した。これは障害防止法に基づく変更許可申請に先立って、X線発生の伴う超電導空洞の電圧印加試験を行えるように講じた措置で、タンデム加速器の設置時にも同様に行っている。労働安全衛生法は労働者に対する安全を規定したものでおもに人に対する線量当量の評価を行った。(詳細は「タンデム加速器付設直線加速器の使用に係る届出書(別添書類)」平成4年11月13日を参照のこと)。

#### 参考文献

- [1] H. W. Bertini, R. T. Santoro and O. W. Hermann, Phys. Rev. C14 (1976) 590.
- [2] K. Tesch, Particle Accelerators 12 (1982) 169.
- [3] A. Rindi and R. H. Thomas, Particle Accelerators 7 (1982) 23.
- [4] Y. Kojima, T. Furuya and T. Nakazato, Jpn. J. Appl. Phys. 21(1982)L86.
- [5] T. Furuya, S. Hiramatsu, T. Nakazato, T. Kato, P. Kneisel, Y. Kojima and T. Takagi, IEEE Trans. Nucl. NS-28(1981)3225.

N 4+

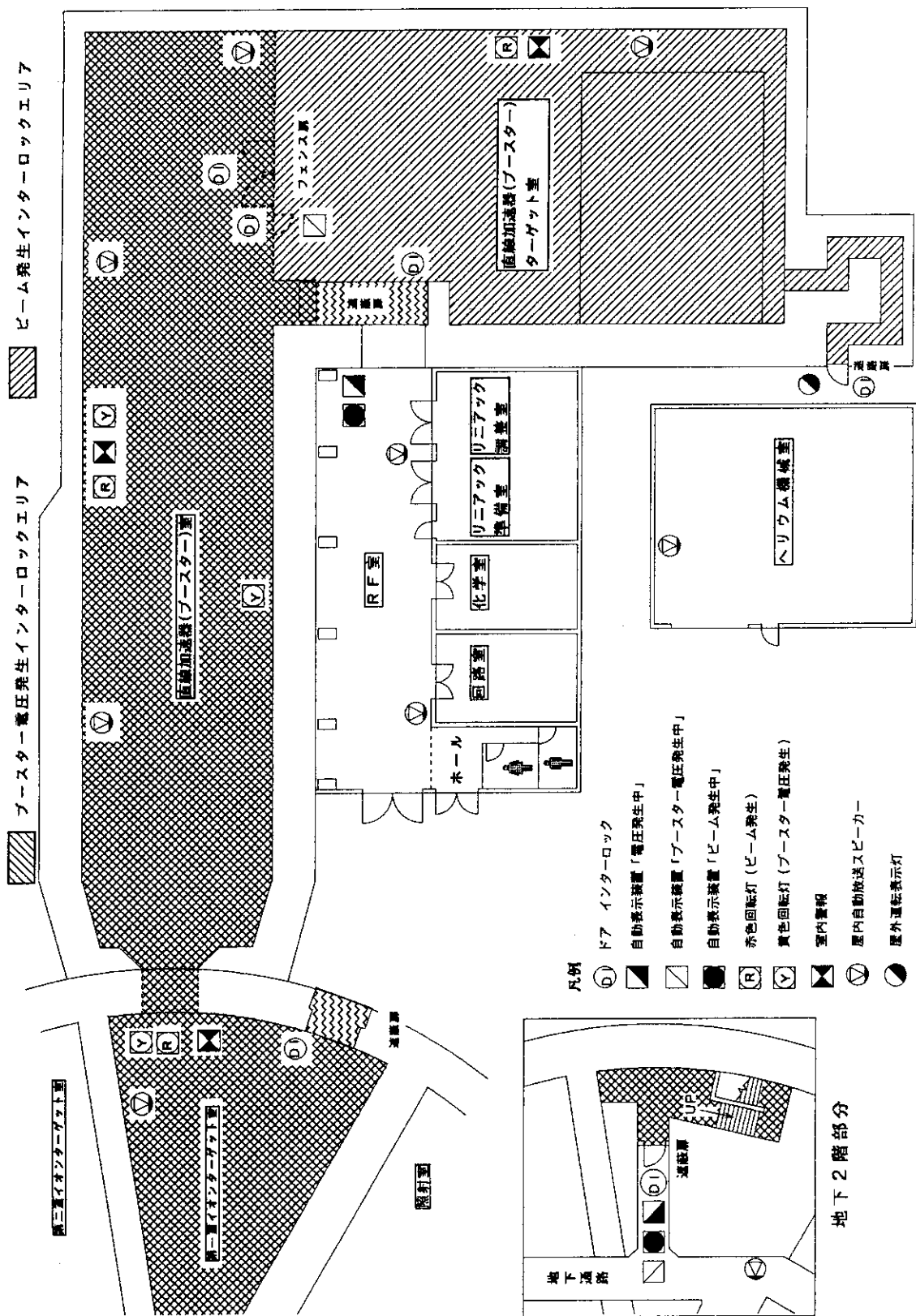


Fig. 4.1 放射線インターロック機器配置図

24+

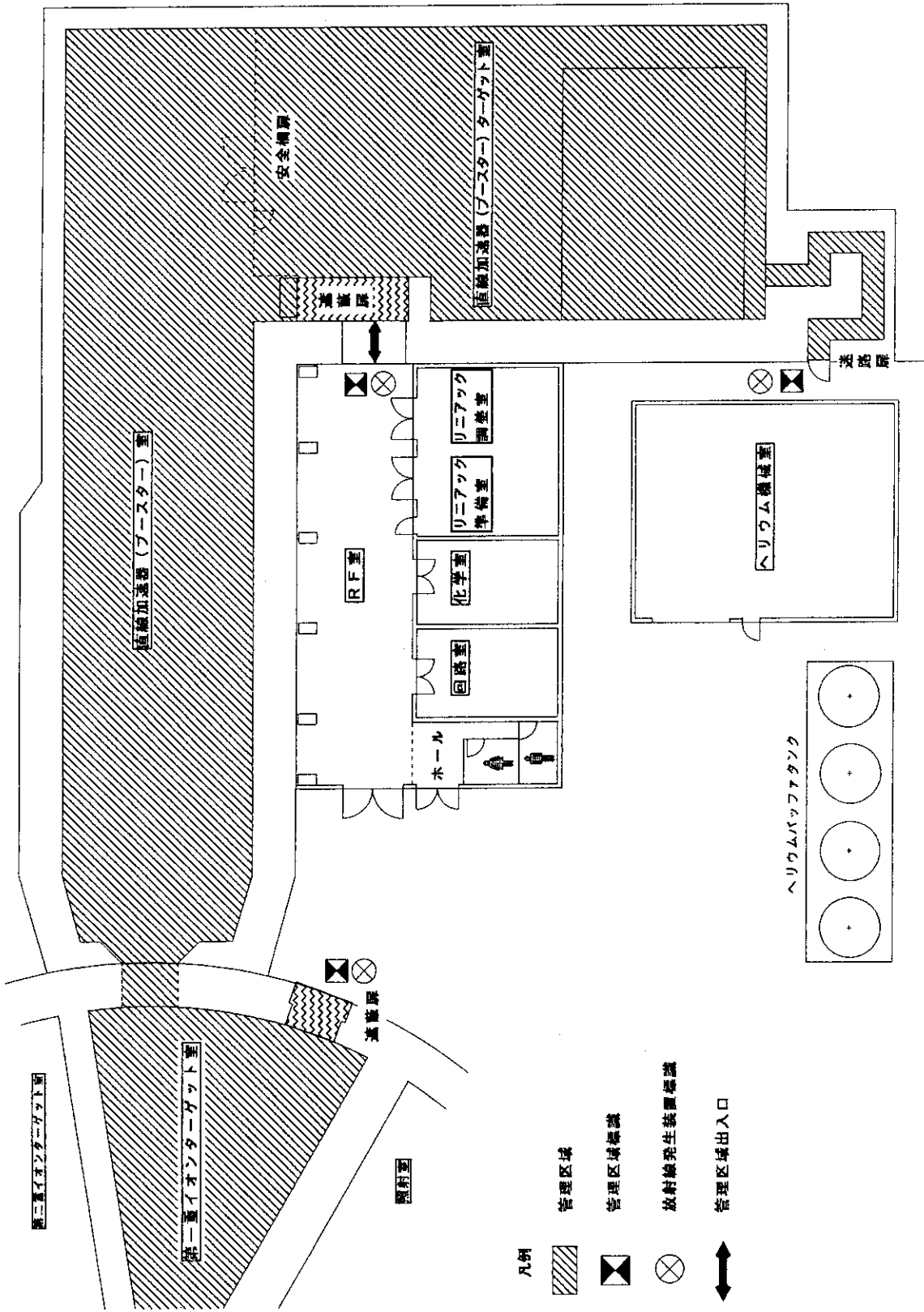


Fig. 4.2 管理区域及び標識の配置図



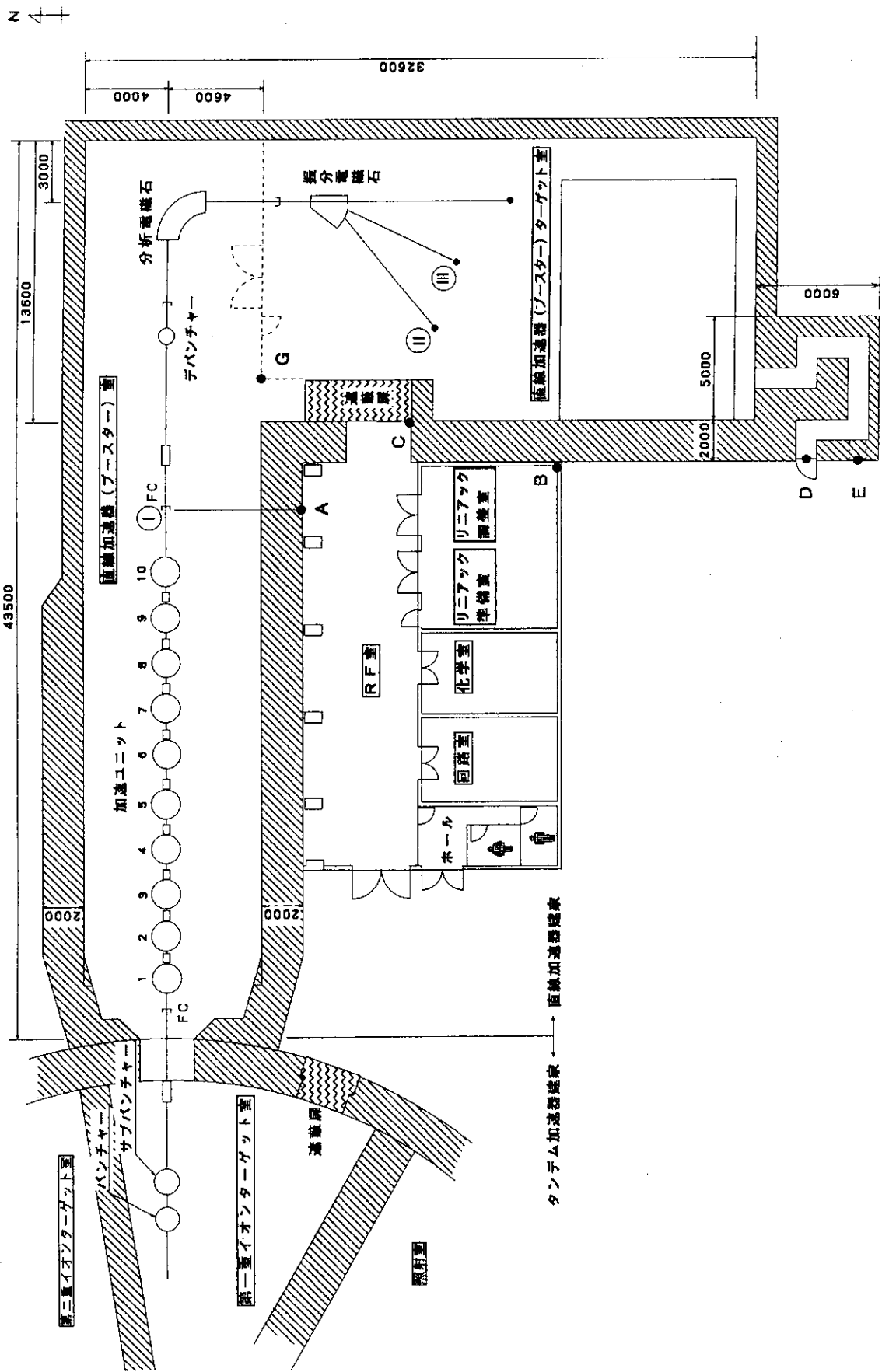


Fig. 4.3a 放射線発生源の位置と評価点(1)

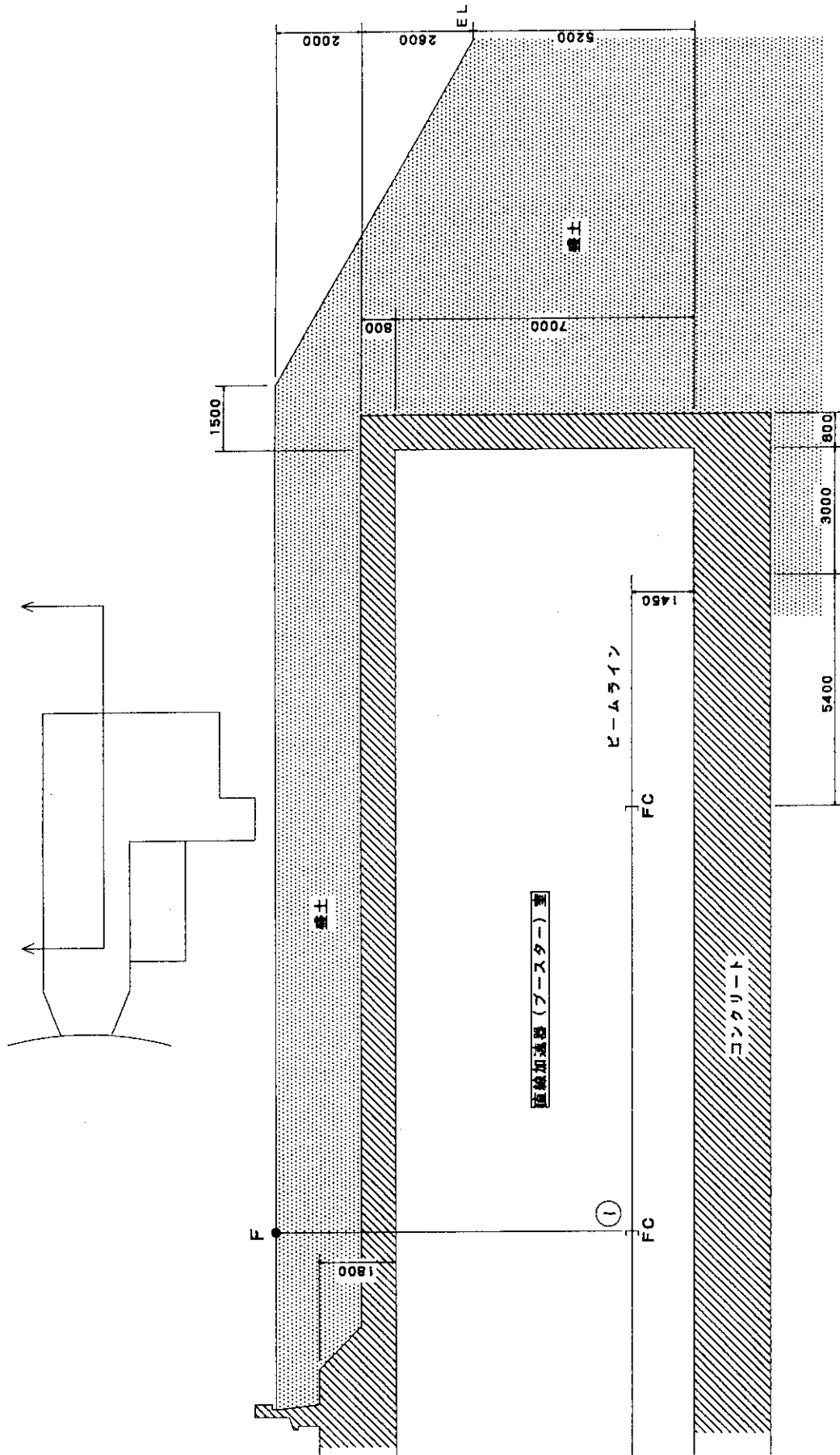


Fig. 4.3b 放射線発生源の位置と評価点(2)

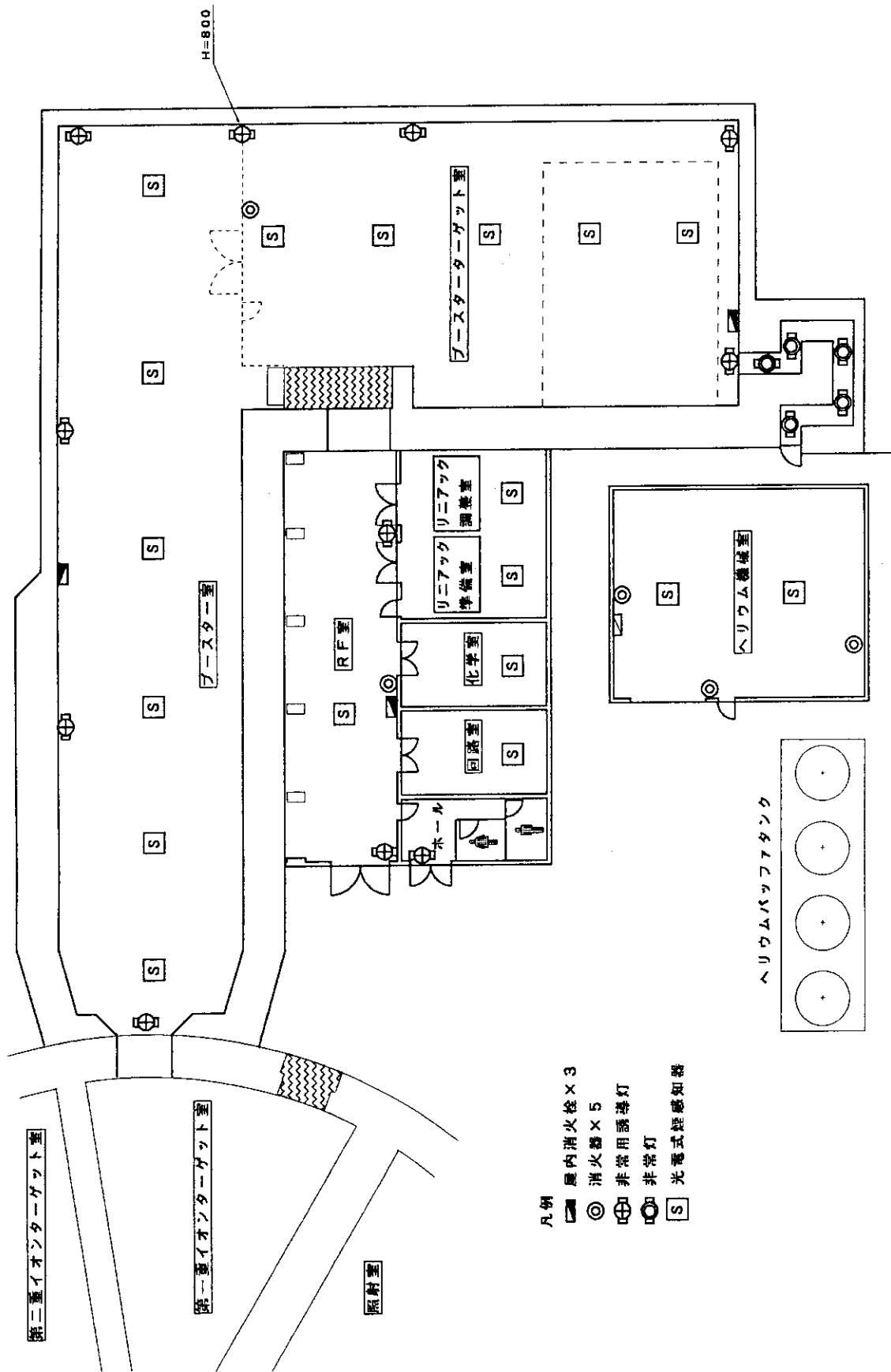


Fig. 4.4 プラスター建家非常用設備

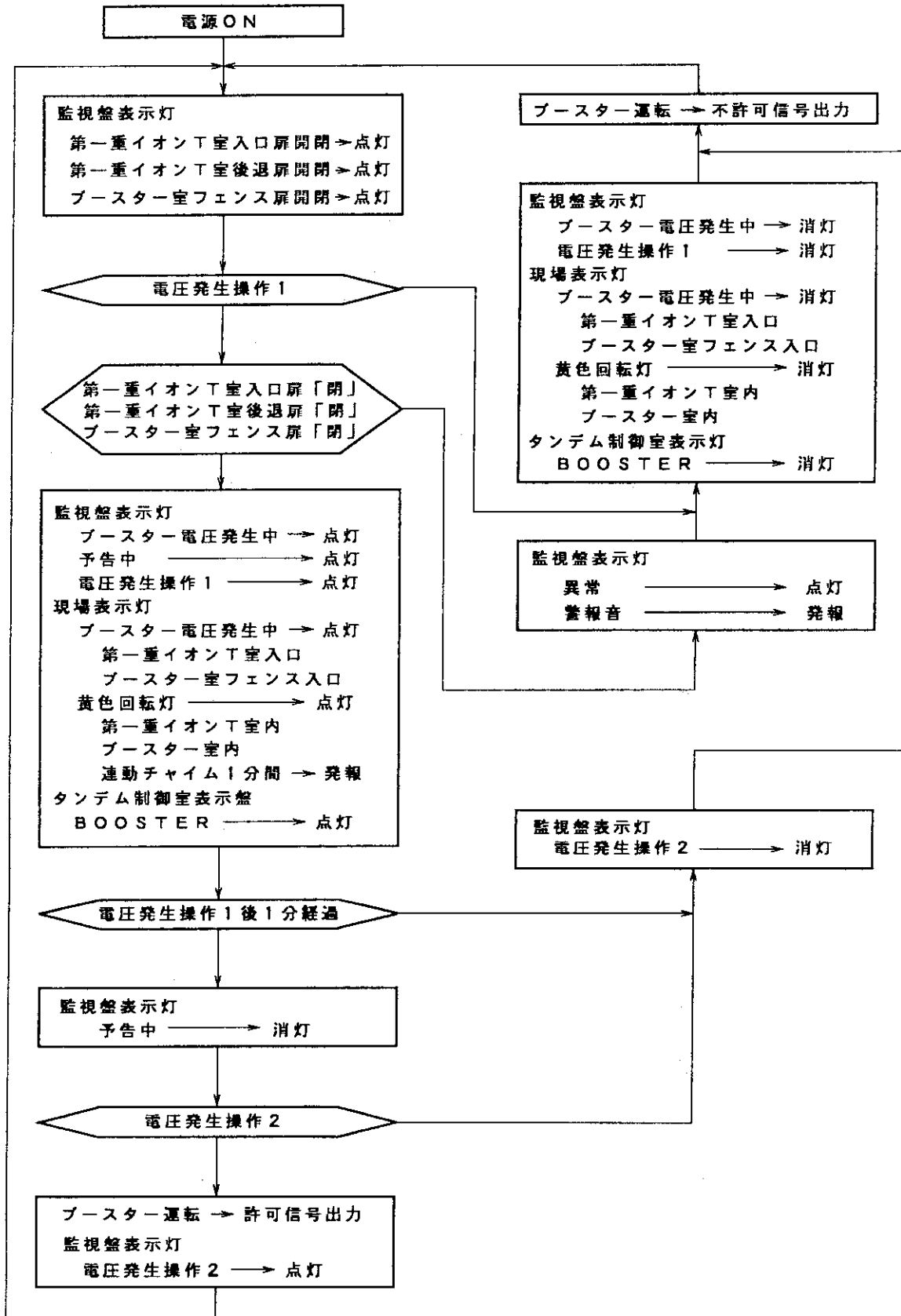


Fig. 4.5 ブースター電圧発生インターロックフローチャート

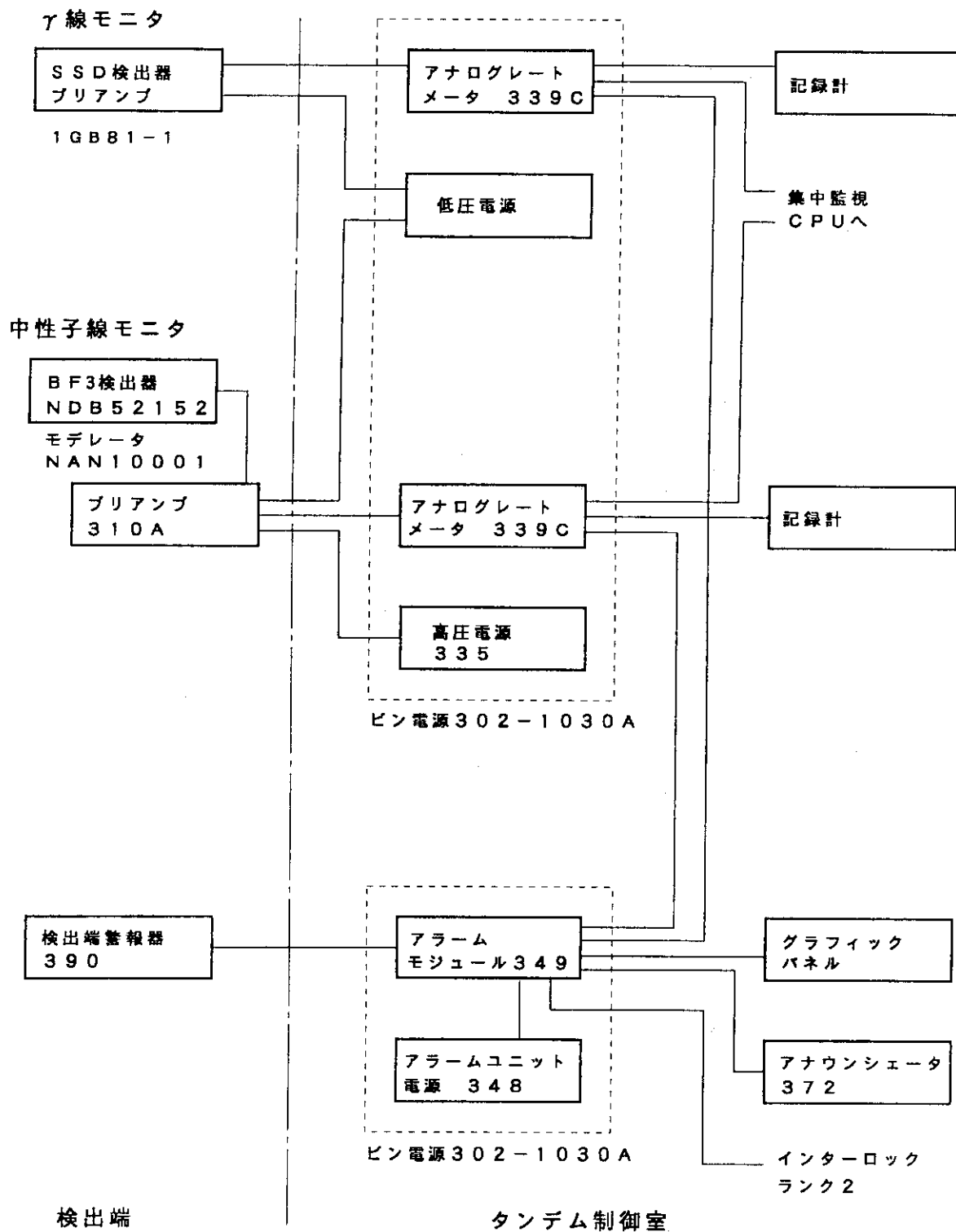


Fig. 4.6 放射線エリアモニタ回路系統図

検出器、現場警報器設置場所

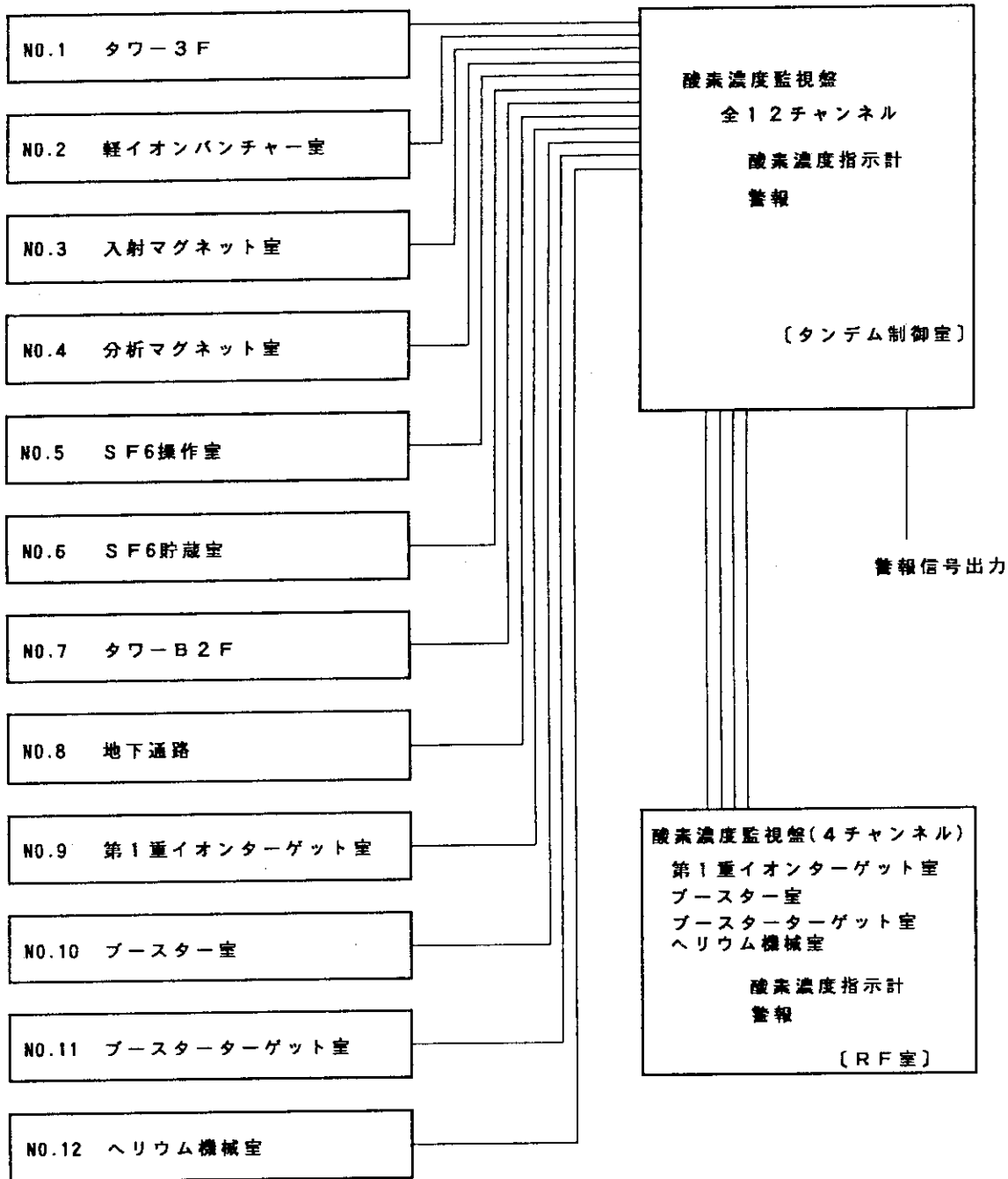


Fig. 4.7 酸素濃度モニター系統図

## 5. ブースターの性能

### 5. 1 ブースター本体試験結果

#### 5. 1. 1 加速ユニット空洞

空洞をクライオスタットに取付け冷凍機で冷却したときのオンラインの空洞性能を一部の空洞について測定した結果をTable 5.1.1 に示す。水素析出の起こる温度領域(130-90K)における温度降下速度は10-12K/hと小さくQ値低下が第1~第4ユニットの空洞(L-1~L-16)に顕著に起こっている。第5~第10ユニットの空洞(L-17~L-40)は幸いQ値低下を免れている。これは第5ユニットの空洞から電解研磨中の水素吸蔵防止の改良を行った結果と考えられる。この結果から高周波入力4Wで運転する場合の加速電界は第1~第4ユニットの空洞(L-1~L-16)では3-5 MV/m、第5~第10ユニットの空洞(L-17~L-40)では6MV/m程度が期待できる。Fig. 5.1.1 は下記のビーム加速試験における空洞の加速電界のグラフである。このときの高周波入力は1空洞あたり大体4Wが上限となっている。なお、L-2 とL-17はそれぞれ回路故障と周波数調整不十分のため使用していない。

オンラインにしてから以下の2点の問題点に出合ったが、無事解決を得た。

- ①多数の空洞で周波数が129.800MHzに満たなかったため(最大10kHz)、ビーム加速試験の初期に再調整を行った。原因は熱サイクルを経て周波数が調整前の周波数に戻ろうとする傾向があることによるものであった。胴部を特製の万力で塑性変形させ精度良く周波数調整した。再調整の結果はほぼ成功であったが、空洞L-17はまだ約2kHz低かった。その後の熱サイクルによる周波数変化は0~-0.5kHz である。
- ②大きな高周波負荷で冷却系(+低温配管系)が不安定になったとき空洞にかかる圧力が大きく変動し(+0.06kg/cm<sup>2</sup>程度)空洞の周波数が100Hz近く変化した。このため2.1.4)項の末に述べた固定金具を空洞の上部底板中央の穴と上フランジ内面の間に取り付けた。その結果、圧力変動時の周波数変動は20Hz 以下に抑えられた。

#### 5. 1. 2 ビーム加速試験結果

Table 5.1.2 にビーム加速テスト記録を示す。1993年11月にファーストビームを得たが、12月から1994年3月の間は上述の空洞の再調整を行った。4月から代表的な重イオンの加速を行い成功した。テスト結果を項目別に以下に述べる。

##### (1) 加速電圧について

第1~第4ユニットの空洞はQ値低下のため5MV/mの加速電界を確保するのは困難であったが、

第5～第10ユニットの空洞は 5-6MV/mの加速電界を発生できた (Fig. 5.1.1参照)。加速電圧の和は28MVとなっている。L-2, L-17空洞を加えれば 30MVを達成できるはずである。第1-第4ユニットの空洞のQ値低下に対しては、1994年11月15日のテストの前の冷却でヘリウムガスの分配を130-90Kの温度範囲で2分割して冷却を試みた結果、約15K/hの温度降下速度が得られ多くの空洞で加速電界が約0.5MV/m改善された。この結果加速電圧の和が30MVを超えることができた。

## (2) 冷却系について

第5ユニットに液体ヘリウムが溜まりにくい問題があった。これは分配弁の開度を必要なだけ大きくすることで対処している。冷却系および空洞周波数の安定を確保するためには現状では1空洞あたり 4Wの高周波入力(損失)以下に抑えなければならないことがわかった。冷凍能力にまだ 4Wの余裕があるので冷却系の今後の改善が必要である。

## (3) 高周波制御回路について

位相の安定度はきわめて良好(0.2°以下)である。ただし、位相(phase reference)の実際の値は表示(設定値)と 2-3°の誤差があった。振幅つまり加速電界の安定度については空洞励起後15分間は回路素子の温度上昇により2%程度の上昇が起こる。定常状態では1%以下である。このテスト期間中いくつかの回路に故障が発生し修理・改良を行ってきたが1-2空洞(主にL-2)分常に不足していた。今後の整備が必要である。

## (4) ビーム診断系について

a. バンチャー(サブバンチャーだけ)の位相の調整は時間スペクトルの測定から容易に調整ができる。しかしエネルギー・時間2次元スペクトルを利用したの振幅(加速電界)の調整は分解能が悪く十分な精度が得られなかった。テストでは空洞の電界ピツアップ感度較正とビーム光学の計算結果をもとに設定した。2.1.8) bで述べたビームバンチ共鳴空洞の利用が今後考えられる。

b. ビームバンチ位相検出空洞は空洞の位相設定に極めて効率的で有効であることがわかった。

c. ビームエネルギー検出器は空洞の位相設定後のエネルギーの確認にたいへん役立った。不可欠な要素である。Au薄膜のターゲットの寿命が数日の短さであることがわかった。Au薄膜の装着枚数を増やす必要がある。

## (5) ビーム透過率について

入射ビームの約60%がバンチされ加速されれば理想的であるから、ビーム透過率 = (加速分析後のビーム電流) / 0.6 × (入射ビーム電流) と定義する。加速テストでは 1994.8.16のNiの場合100%が得られている。しかし、それ以外は50%程度にとどまった。原因はいろいろ考えられるが判明していない。今後テストを重ね原因究明と改善をする必要がある。



Table 5.1.1 オンライン空洞性能試験結果

Res.No.	Q(low field)	Q(i.f.) / Q(off-line)	Ea(4w in) (MV/m)	$-\Delta T/\Delta t$ at 120K (K/h)
BN-1	$6.1 \times 10^8$	0.71	2.8	11
BN-2	$7.3 \times 10^8$	0.61	5.0	10
L-1	$7.3 \times 10^8$	0.73	5.1	10
L-3	$3.3 \times 10^8$	0.27	3.0	10
L-5	$6.1 \times 10^8$	0.45	4.4	10
L-8	$7.2 \times 10^8$	0.55	5.4	11
L-9	$8.0 \times 10^8$	0.70	5.1	10
L-13	$2.8 \times 10^8$	0.27	3.8	10
L-16	$5.0 \times 10^8$	0.35	4.4	10
L-17	$1.05 \times 10^9$	0.76	7.0	10
L-22	$9.2 \times 10^8$	1.0	6.6	12
L-26	$9.6 \times 10^8$	0.65	7.0	12
L-29	$1.21 \times 10^9$	0.94	6.4	10
L-33	$1.24 \times 10^9$	1.0	6.4	10
DB-1	$6.5 \times 10^8$	0.75	4.9	12
DB-2	$3.3 \times 10^8$	0.33	4.0	13

Table 5.1.2 ビーム加速テスト結果記録

テスト年月日	加速イオン	エネルギー 入射 出力 (MeV)	電流 入力 出力 (enA)	使用 空洞数	電圧和 $\Sigma jV_{aj}$ (MV)	同期 (deg)	周波数 位相 (MHz)
1993.10.28	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164	(ビーム貫通テスト)				
1993.11.3	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164	(バンチャーのテスト)				
1993.11.3	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 199	- -	7	3.2	-30	129.800
1993.11.9	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 208	200 20	12	6.1	-30	129.800
1993.11.25	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 261	82 24	25	18.7	-30	129.796
1994.4.7	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 291	130 38	38	16.6	-30	129.800
1994.4.12	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 351	130 40	37	24.6	-30	129.800
1994.7.5-6	$^{35}\text{Cl}^{10+}$	164 351	- -	37	24.6	-30	129.799
1994.7.6	$^{35}\text{Cl}^{14+}$	164 446	80 16	38	27.6	-25	129.799
1994.7.26	$^{58}\text{Ni}^{20+}$	190 628	80 30	38	28.2	-30	129.799
1994.8.15	$^{58}\text{Ni}^{20+}$	190 606	33 10	37	27.6	-30	129.799
1994.8.16	$^{58}\text{Ni}^{20+}$	190 658	170 100	37	27.7	-18	129.799
1994.9.5	$^{107}\text{Ag}^{25+}$	231 799	45 15	37	27.6	-21	129.799
1994.9.14	$^{127}\text{I}^{27+}$	225 812	20 4	38	28.3	-25	129.799
1994.11.15	$^{127}\text{I}^{27+}$	225 880	100 23	38	30.2	-18	129.797
1994.11.29	$^{197}\text{Au}^{25+}$	340 912	19 3	39	30.7	-22	129.797

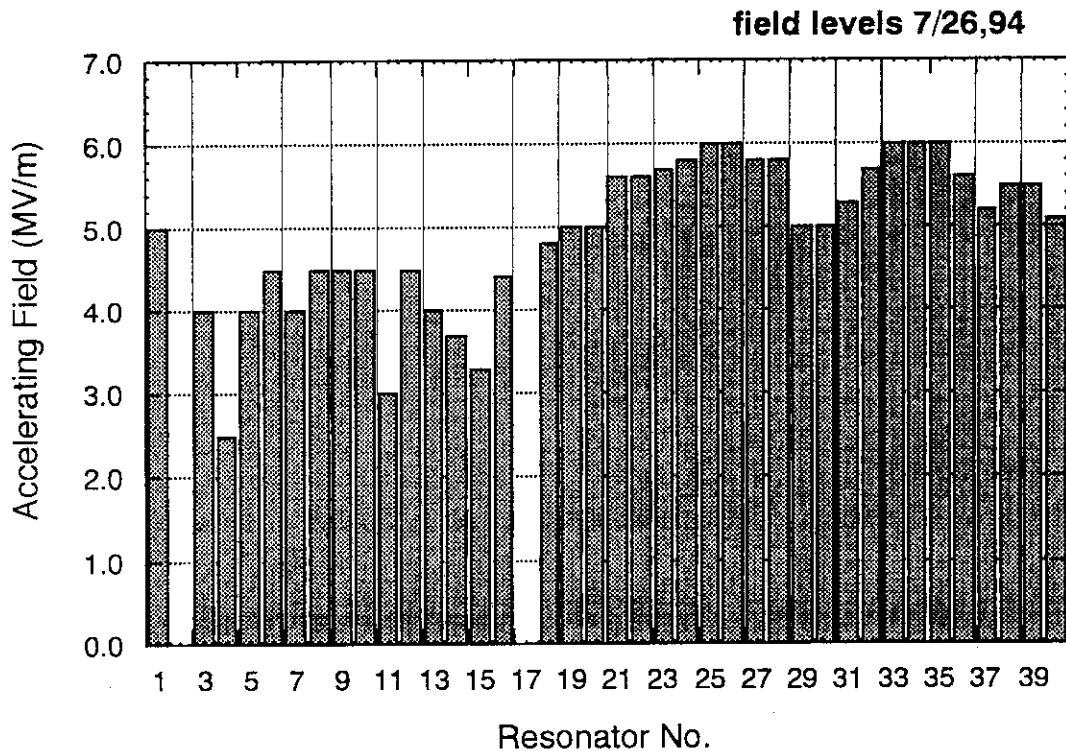


Fig. 5.1.1 オンラインの加速電界性能

## 5. 2 ヘリウム冷却系の性能

### 5. 2. 1 性能試験

1992年7月、ヘリウム冷却系の完成検査を終了しガスの準備ができたところで性能試験をおこなった。性能試験は冷却系の総合的な試験であるがここでは主に液化器の性能について述べる。ヘリウム液化器の試験は単体試験とクライオスタットを組み合わせたの試験であり、液化機に内蔵しているヒーターおよびクライオスタットに取り付けてあるヒーターを用いた。後者のヒーターはPC(パソコン)にて制御され 2Wステップで最高 30Wの電力を調整できるほか全クライオスタット同時にオン、オフできるようになっている。性能試験における結果の詳細は以下の通りである。

#### (1) 冷凍機単体試験

冷凍機単体試験は負荷側のクライオスタットをバルブにより切り放し、液化器に内蔵しているヒーターにより行われた。液体ヘリウムに関する試験は液化器内の 400Wヒーターを使用し、80Kについては膨張タービンの前に設置されている 1,500Wのヒーターを使用した。各試験に於ける合格基準は液体ヘリウム系については 250W以上の入熱で液面、圧力が一定で安定な運転ができることである。また、80K系については液体ヘリウム系に 250W入熱した状態で 1,500W入熱しタービンの入口温度が85K以下であることである。試験結果はTable 5.2.1 の通りであり、所期の性能は充分満足することとなった。

Table 5.2.1 ヘリウム冷凍機の性能

	前段部	後段部
4K ヘリウム液溜ヒーター電力	273 W	277 W
差圧(液面高)	6.6 mb(66cmH <sub>2</sub> O)	6.5 mb(65cmH <sub>2</sub> O)
圧力	1.21 bar	1.20 bar
80K タービン入り口ヒーター電力	1,580 W	1,563 W
温度	79.7 K	81.2 K

#### (2) 総合冷却試験

クライオスタットを接続した実際の運転同様の総合冷却試験ではクライオスタット内の空洞および熱シールドの冷却速度を調整するため予冷試験および負荷変動試験を行った。予冷試験は運転開始後空洞および熱シールドの冷却速度を測定した。熱シールドの冷却速度はクライオスタット内の不純物による空洞の汚染を防ぐため先行して冷却するようにプログラムされているが、空洞の冷却は温度変化による機械的歪みから構成部品の機械的歪みによる変形や接続部の真空漏れを防ぐため急速には冷却できない。一方、超電導状態で動作させる空洞はその特性

の劣化を防ぐため、130K以下 90Kの範囲を機械的強度が許容される速い速度での冷却が望まれる。負荷変動試験は各クライオスタットに 4Wステップで 16W、5台のクライオスタットに合計 80Wまで入熱および急なヒーターのカット試験を行い液面変動、冷凍機の安定度を観察したが試験の結果は良好であった。各試験の目標値等は以下の通りである。

- ・空洞温度 (Tc) - シールド温度 (Ts) > 50 K (ただし、200K ≥ Ts ≥ 150K)
- ・空洞温度 - (T1172) < 100 K
- ・クライオスタット間温度差 ≤ 50 K (ただし、室温 ≥ (Tc, Ts) ≥ 150K)
- ・熱負荷変動試験

クライオスタットに貯液後各クライオスタットに 16W入熱する。

上記の状態では 80Kラインのヒーターに 200Wの熱負荷を加え、冷凍機が安定に運転できること。

以上の試験結果をFig. 5.2.1 に示す。また、この時の 80Kヘリウムガスおよび液体ヘリウム用分配弁の開度をTable 5.2.2 に示す。

Table. 5.2.2 液体ヘリウムおよび80kガス分配弁開度

	液体ヘリウム系	80 K シールド系
クライオスタット B	13 %	51 %
SB	7 %	51 %
#1	10 %	70 %
#2	9 %	70 %
#3	10 %	70 %
#4	10 %	70 %
#5	25 %	70 %
#6	17 %	70 %
#7	18 %	70 %
#8	17 %	70 %
#9	17 %	70 %
#10	17 %	70 %
DB	9 %	51 %

冷却試験に於ける空洞の冷却状態をFig. 5.2.2 に示す。Fig. 5.2.2 の曲線が途中で2系統に分かれているのは空洞の冷却速度を150K以下のところで早める試験によるものである。

Fig. 5.2.3 は液体ヘリウムの貯液状況である。Fig. 5.2.4 はクライオスタット間の温度差をそろえて貯液したときの状況であるが、この時は前段部の#5のクライオスタット (第5加速ユニッ

ト) がかなり取り残された形になっている。

冷却運転を終了させクライオスタットの液体を回収するにはリカバリー運転をするが、すべての液体を回収するには約5時間を要する。システム全体を停止するには約1日リカバリー運転を行い、後にシステムまたはコールドボックス・ウォームアップを行う必要があり、合計約2日の時間を要する。

## 5. 2. 2 負荷試験

### (1) ヒーターによる負荷試験

バンチャー、デバンチャー関係を除く10基のクライオスタットの液体ヘリウム貯槽部には、30W以上の電力を入れることのできるヒーターを設けてある。このヒーターは冷凍機への負荷を常に一定にするためおよび負荷試験で使用するため作られたものである。主に空洞からの熱が入るに従いヒーター電力を落とすことができるように考えられたものであるが、実際に負荷がかかる運転が進むにつれ必ずしもその必要がないことがわかり、現在は負荷試験の時だけ使用している。

ヒーターによる試験では、まず1基ずつのクライオスタットの負荷試験を行った。負荷試験の基準はヒーター電力をあげていき、液面が減少し始まる状態を観察するようにした。この試験に於ける結果およびその時の各分配弁の開度をTable. 5. 2. 3 に示す。

Table. 5. 2. 3 負荷試験による分配弁の開度および許容電力

		1 回目	2 回目
		分配弁開度/入力電力	分配弁開度/入力電力
クライオスタット	#1	10%/16W	13%/24W
	#2	9%/16W	8%/28W
	#3	16%/16W	11%/24W
	#4	10%/16W	7%/28W
	#5	34%/16W	37%/(5MV/m4基)
	#6		10%/24W
	#7		14%/24W
	#8		14%/24W
	#9		11%/28W
	#10		13%/26W

一回目の試験は前段部だけの試験であるが、一定の電力を入力し分配弁の開度を決めた。二回目は1空洞あたり6W(定格負荷の50%増)の負荷に必要な開度を定める試験を行った。#5ク

ライオスタット（第5加速ユニット）はヒーターによる試験は行えなかったため実際の負荷試験の結果を記してある。最後に、全クライオスタットに16Wの負荷を与えたとき液面の低下、空洞にかかる圧力の変動のないことを確認した。

## （2） 実負荷運転

ヒーターによる試験が終了し液体ヘリウムの分配弁の開度が決定したところで実際の高周波の負荷に対する運転を行った。実際にイオンビーム加速試験を行った時の高周波入力電力と分配弁の開度をTable 5.2.4 に示す。#1～#4（第1～第4加速ユニット）は空洞のQ値低下による高周波損失が大きくすなわち負荷が大きく、分配弁の開度をヒーターによる負荷試験の結果よりも増すこととなった。#5～#10は空洞のQ値が高く各空洞とも4W以下の負荷で運転がなされた。バンチャー、サブバンチャーおよびデバンチャーは低い電界で運転しているためほとんど負荷となっていない。

Table. 5.2.4 高周波負荷時の分配弁開度及び入力電力

	分配弁開度	11/16 I 加速時	11/28 Au 加速時
クライオスタット B	13 %	0.04 W	0.1 W
SB	11 %	0.06 W	0.1 W
#1	16 %	11.5 W	15.5 W
#2	10 %	17.9 W	15.5 W
#3	12 %	15.2 W	12.9 W
#4	7 %	16.9 W	16.0 W
#5	35 %	4.8 W	6.3 W
#6	10 %	14.0 W	15.2 W
#7	18 %	12.8 W	11.8 W
#8	14 %	10.8 W	12.7 W
#9	12 %	13.2 W	11.2 W
#10	13 %	14.1 W	15.4 W
DB	10 %	0.26 W	0.18 W

## 5.2.3 問題点

ヘリウム冷却系の運転は多くの障害に見舞われた。本文でも数多く出てきた分配弁については低温配管上にあるもののみならず、コールドボックスに設置してある同型の分配弁も調整不

完全による動作不良のものがあった。多くは空気量による感度調整用のトリマー部の調整で回復するが、運転準備段階では正常に動作したものが実際の運転時に動作しないものがしばしば発見され、システムを停止することがあった。検取時に行った試験運転ではヘリウム冷凍機は安定に運転されたが、実際の運転では冷凍機の制御パラメーターを変更しなければならなかった。現在も十分ではなく、さらに試験を繰返し安定に運転できるパラメーターを得る必要がある。また、分配弁の開度を1%開けるだけで状態が大きく変化した。CV値が小さく流量特性が緩やかなバルブを設置することが急務である。

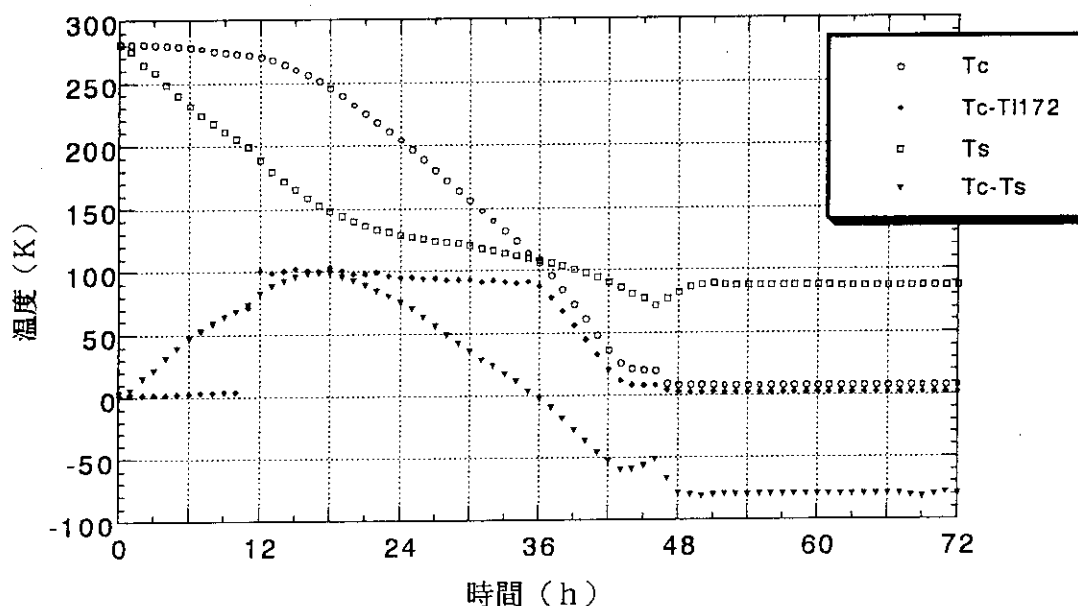


Fig. 5.2.1 空洞温度 (Tc) , 80Kシールド温度 (Ts)

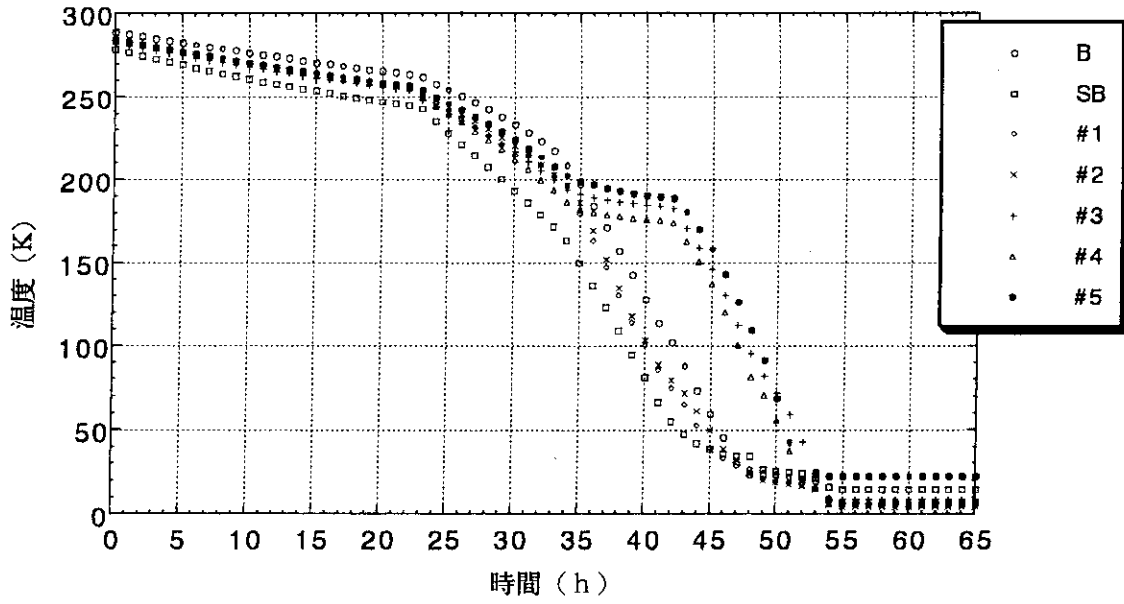


Fig. 5.2.2a 空洞温度降下 (前段部)

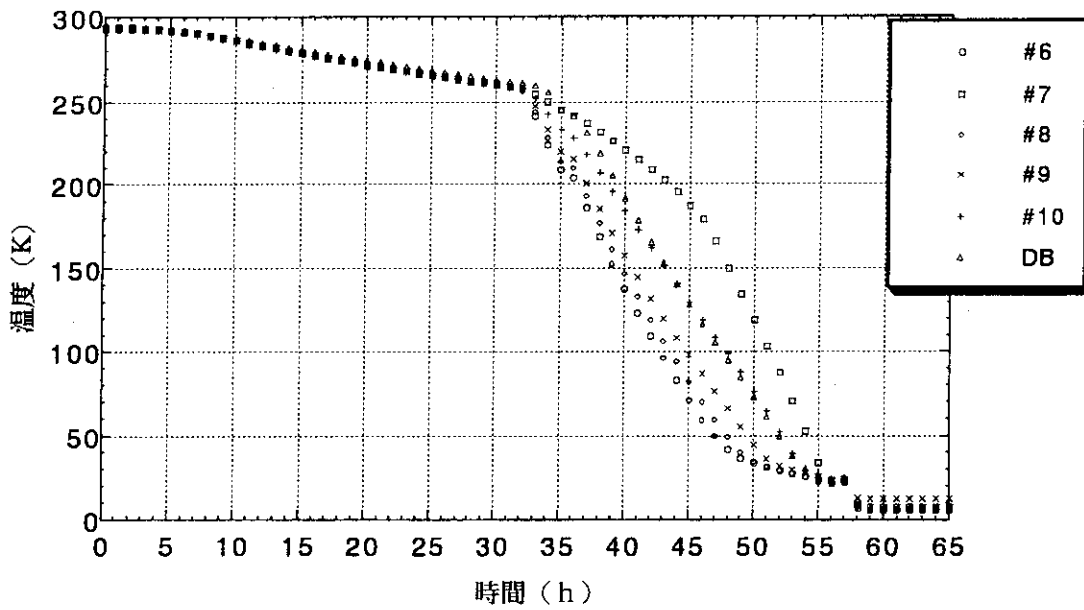


Fig. 5.2.2b 空洞温度降下 (後段部)



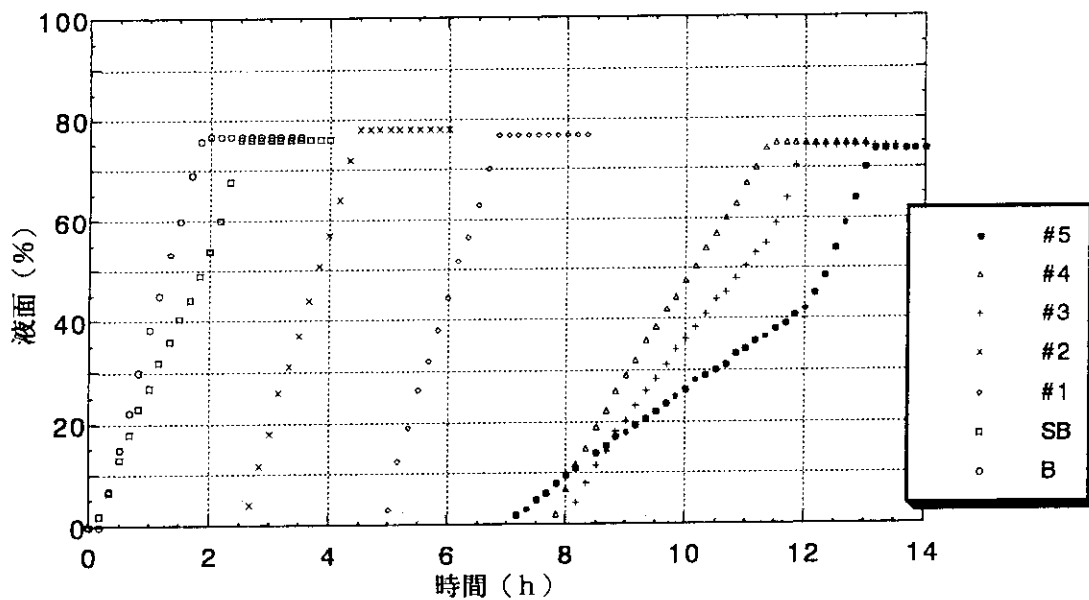


Fig. 5.2.3a 液面測定 (前段部) - A

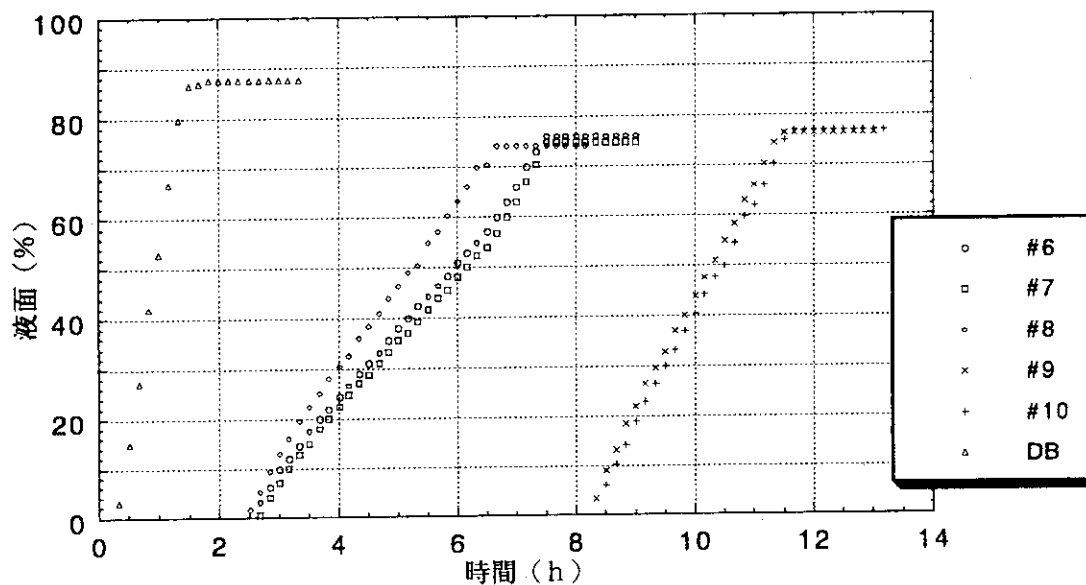


Fig. 5.2.3b 液面測定 (後段部) - A

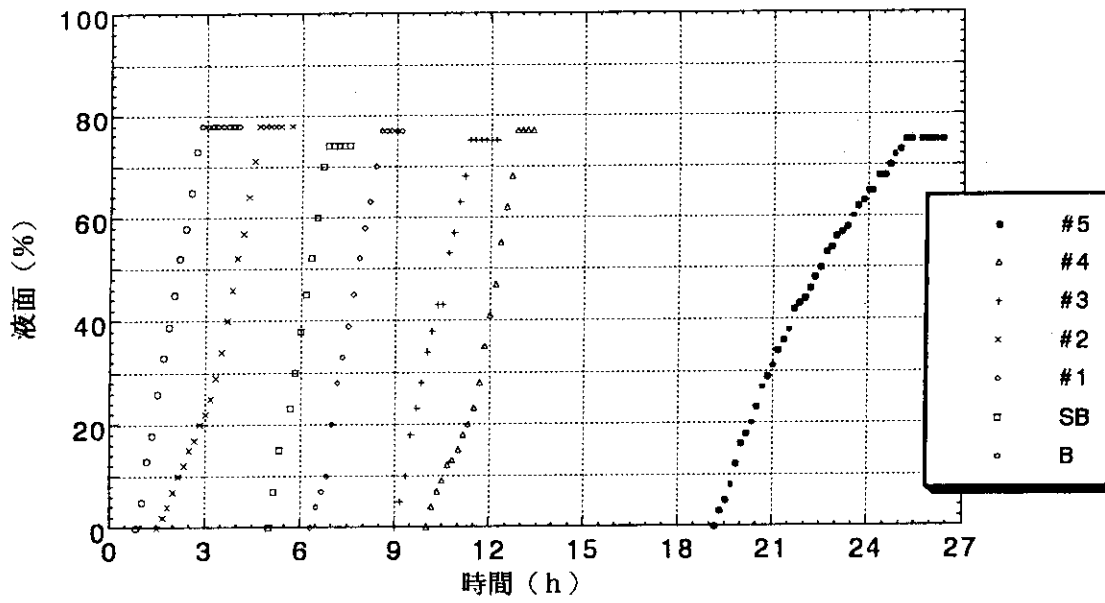


Fig. 5.2.4a 液面測定 (前段部) -B

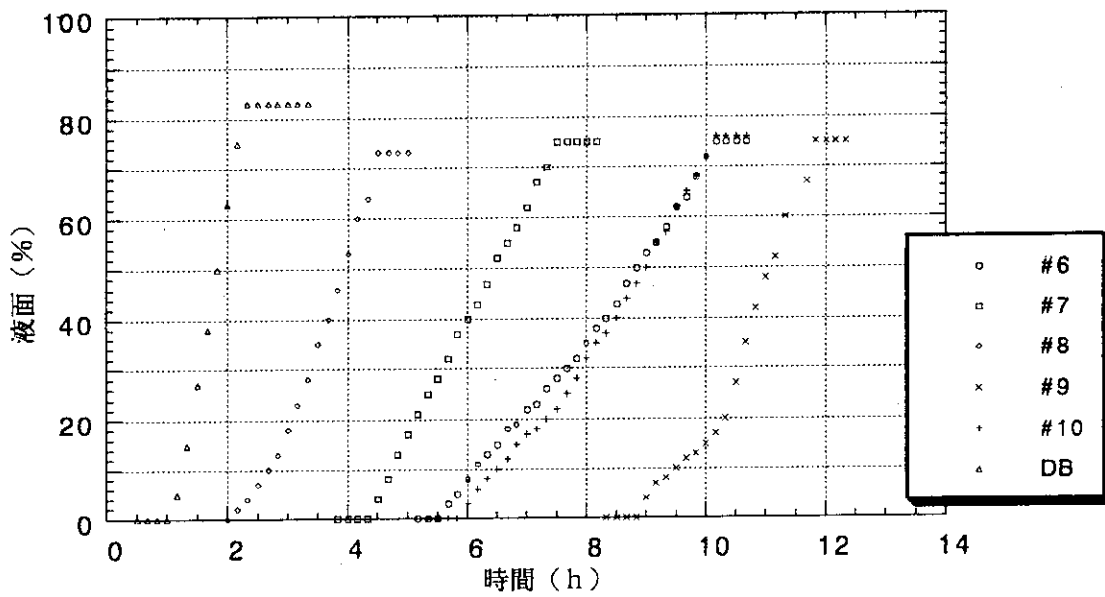


Fig. 5.2.4b 液面測定 (後段部) -B

## 6. ブースターを使った研究

### 6. 1 ブースターを使った原子核研究

原子核物理の研究としては、重い未知原子核の合成とその核構造の研究があげられる。原子核は陽子と中性子から構成されていて、自然界に存在する原子核の陽子数に対する中性子数の比は原子番号（陽子数）の小さいところで1から原子番号の大きなウランで1.6程度である。この違いは原子番号が大きくなると陽子間の電氣的斥力が大きくなって原子核がぼらぼらになろうとする傾向があり、電氣的に中性な中性子を増やすことによって原子核の安定性が保たれているためである。従ってこの値からかけ離れた原子核は不安定でたちまち崩壊して消滅する。

実験室で作られる不安定原子核として最近、 $^{11}\text{Li}$  や $^8,^{10}\text{He}$ などが話題になっている[1]。これは陽子数を一定にして中性子数を増やしていった極限で原子核がどのような性質を持つのかという問いである。逆に中性子数を一定にして陽子数を増したら原子核はどうなるのかという問いもある。この典型例は $^{100}\text{Sn}$ で、10個ある安定な同位体のうち一番軽い $^{112}\text{Sn}$ からさらに12個中性子が少なく陽子数と中性子数がともに50の原子核である。50という数はマジック数であり、この数を持つ原子核は特に安定であると考えられるため、昔から多くの研究者が注目してきた。最近ようやく $^{100}\text{Sn}$ がつくられ大きな話題を呼んだ[2]。

陽子数に対する中性子数の比を変えることの他に、陽子数を極端に増やしたら原子核は果たしてどこまで安定に存在できるのだろうか、という問いも可能である。原子番号92のウランが自然界に存在するいちばん陽子数の大きな原子核である。ウランより重い原子核のネプツニウムやプルトニウムはウランに中性子や重水素を融合させて人工的に合成された。さらにこれらの超ウラン元素に中性子やアルファ粒子それに炭素や窒素などの重イオンを融合させて、106番まで合成されている。最近107番から109番の原子核が鉛やビスマスに加速器からのクロムイオンや鉄イオンを核融合させることによって合成された[3]。この先どこまで原子番号の大きな原子核ができるか、という問いに対してFig. 6. 1. 1に示したように陽子数114がマジック数（安定な原子核）であるという理論予想がある[4]。さらに110番も変形した原子核で準安定という予想も出されている[1]。原子番号100以上の原子核の同位体は現在100個程合成されているが、106番以上では10個程にすぎない。この重元素領域の未知同位体を多数合成することによって、陽子数と中性子数がともに大きくなった極限状態の原子核の振る舞いを調べる研究が原研タンデム加速器ブースターにおいて計画されている。

原子核には外部からエネルギーが加えられると、その構造を大きく変える性質がある。基底状態では原子核は球形をしているが、原子核に回転（スピン）が加わると液滴としての原子核の性質からコリオリ力や遠心力などによってその形が容易に変る。この性質に殻効果（マジック

ク数を生み出す原因となっている)が加わって、Fig. 6. 1. 2 に示したような多様な原子核の変形状態が出現する。例として、基底状態近傍で弱いみかん型変形をしていた原子核が、励起状態でレモン型に変わる。さらにエネルギーが高くなるとレモン型の巨大変形(超変形)になる[5]。理論的にはさらに、みかん型や円盤形の巨大変形、バナナ型の巨大変形も予言されている[6]。これら原子核の変形を研究することは、そのエキゾチック性のみならず、励起エネルギーと回転の極限における原子核模型の検証にとって重要である。

以上のように自然界に安定に存在する原子核から極端にかけ離れた原子核や極端に変形したエキゾチックな原子核を合成しそれらの性質を研究するために、タンデム加速器ブースターの実験装置として現在反跳生成核分離装置と多重ガンマ線検出器を製作中である。以下にこれら実験装置についてその概略を述べる。

### 6. 1. 1 反跳生成核分離装置

原子核ビームと標的原子核の融合反応では、生成された原子核はビームと同じ方向に飛び出す。ところで重イオンと標的原子核の融合確率はそれぞれの原子核の原子番号が大きくなるに従って極端に小さくなる。また陽子数に対する中性子数の比がすでに述べた安定な領域を越えた未知原子核の生成確率も小さくなる。ほとんどのビームは標的原子核と反応せず、標的を素通りする。従ってビームと同じ方向では大量の未反応ビームが存在し、そのなかに核融合で生成された未知原子核がほんのわずかに存在するにすぎない。このため大量の未反応ビームを取り除いてこの未知原子核だけを取り出す必要がある。反跳生成核分離装置はこのための装置で、Fig. 6. 1. 3 のように高電場発生装置と電磁石の組み合わせからできている。この装置は、未反応ビームと未知原子核を分離するだけでなく、未知原子核の質量も測定できる。この装置の性能をTable 6. 1 に示す。ビームより分離された未知原子核は検出部に設置した半導体検出器に埋め込まれる。ここで未知原子核の崩壊特性が測定される。この装置では標的位置から検出部まで(約9m)未知原子核が通過するのに約 $1 \mu\text{s}$ かかる。そのためこの時間よりも長い寿命をもつ未知原子核が測定可能となる。

この種の装置で重要なことは、研究対象である未知原子核と未反応ビームの分離の精度である。未知原子核の生成率が低い場合、検出器に入ってくるビームによるバックグラウンドをできるだけ低くおさえなくてはならない。このための方策が高電圧電極部に施されている(ビームが当たらないように陽極を上下に2分割してある等)。これによって未反応ビーム量 $10^{12}$ 個のなかに埋もれた1個の未知原子核を検出できるように設計された。例えば原子番号106番以上の極端に生成率の小さな未知原子核(生成断面積 $=10^{-34}\text{cm}^2$ 程度)や $^{100}\text{Sn}$ などのエキゾチックな未知原子核の合成を目的としている。

Table 6.1 反跳生成核分離装置の性能

磁石構成	QQEMEQQO
立体角	可変 7 - 15 msr
横倍率	1.66
縦倍率	1.17
質量範囲(m/q)	± 4 %
質量分散	可変 0.5 - 1.5 cm/%
質量分解能(A/ΔA)	300 以上
エネルギー範囲	± 12 %
最大電界	45 kV/cm
電極半径	4 m
最大磁場	1 T
磁場半径	1 m
回転角度	-5° - +40°
全長	9.3 m

Q:4極電磁石、E:高電界、M:2極電磁石、O:8極電磁石

### 6. 1. 2 多重ガンマ線検出器

原子核反応によって生成された原子核は高い励起状態にあり、数10本のガンマ線を放出して基底状態に落ちる。このとき、特定の変形状態は回転バンドという強く結合した状態群を経由し一連のガンマ線を放出する。この一連のガンマ線は極端に強度が弱いため単独のガンマ線検出器では他の強いガンマ線群に隠されて同定できない。そこで多数のガンマ線検出器を全立体角を覆うように配置した多重ガンマ線検出器アレイ（クリスタルボール）が開発された。これによって、変形状態から出る極端に強度の弱い一連のガンマ線も回転バンド内での相関を見ることによってその同定が可能になった。

国内では筑波大学と理化学研究所において小規模のアレイが作られたのみで本格的なクリスタルボールは現在作られていない。日本原子力研究所ではタンデム加速器ブースターが本格的に稼働するのに合わせて、筑波大学型の検出器を11~12台集めた全国規模の核分光国内共同実験のための準備が進められている（Fig. 6.1.4）。新たに世界最大級のクリスタルボールを建設する将来計画も検討されている。

この多重ガンマ線検出器は原子核の巨大変形状態の研究のみならず、反跳生成核分離装置と組み合わせることによって、陽子数と中性子数が安定領域から極端に離れた未知原子核の核構造を研究する最良の実験装置でもある。

参考文献

- [1] A. A. Korshennikov et al., Phys. Lett. B326(1994)31.
- [2] M.-G. Saint-Laurent, Proceedings of Tours Symposium on Nuclear PhysicsII, August 30-September 2, 1994 (to be published from World Scientific Pub. Co.); also see GSI- Nachrichten 04-94, 1994.
- [3] see GSI-Nachrichten 08-92, 1992.
- [4] P. Möller and J. R. Nix, Nucl. Phys. A549(1992)84.
- [5] W. Nazarewicz, R. Wyss and A. Johnson, Nucl. Phys. A503(1989)185.
- [6] C. G. Andersson et al., Nucl. Phys. A309(1978)141; T. Bengtsson, et al., Physica Scripta 24(1981)200.

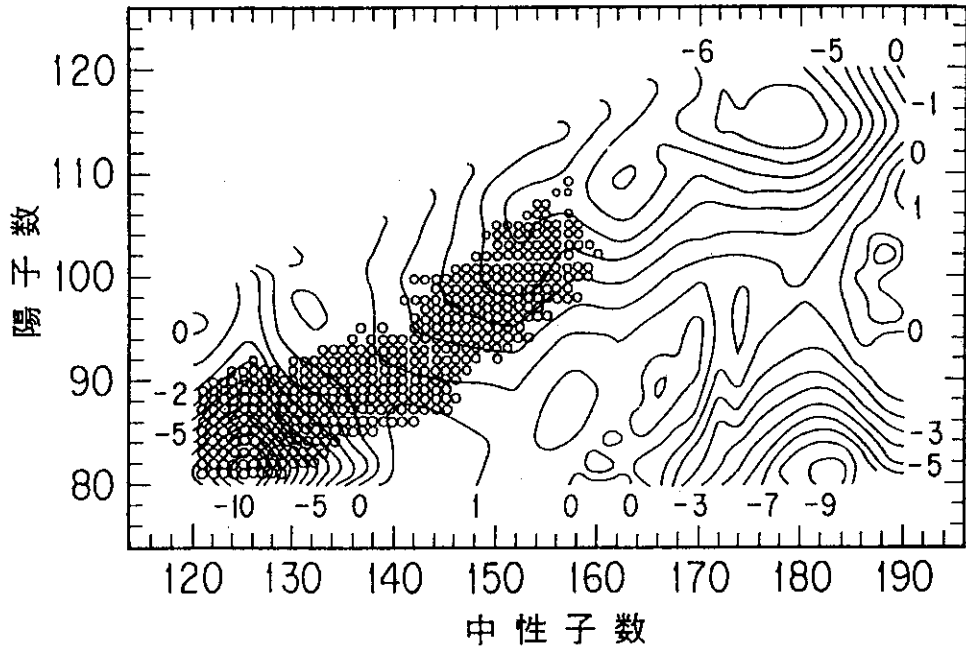


Fig. 6.1.1 殻構造エネルギーの計算値。図中の数値が負で大きくなるほど対応する中性子数と陽子数をもつ原子核は安定になる。陽子数114，中性子数178からなる原子核は鉛208（陽子数82，中性子数126）の次のマジック核である。今までに発見または合成されている原子核を丸印で示した。

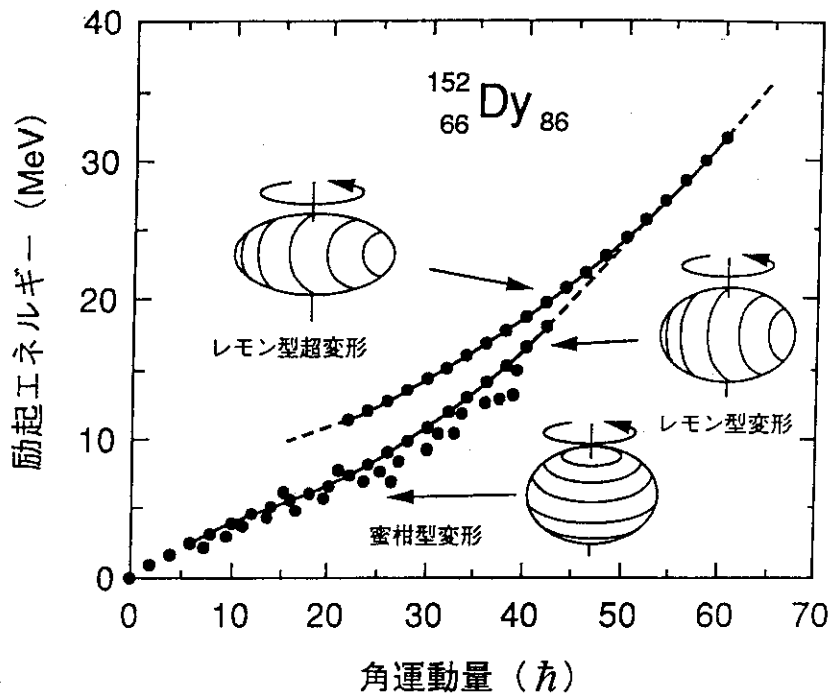


Fig. 6.1.2  $^{152}\text{Dy}$ の準位図 黒丸は準位，実線は回転バンドを示す。

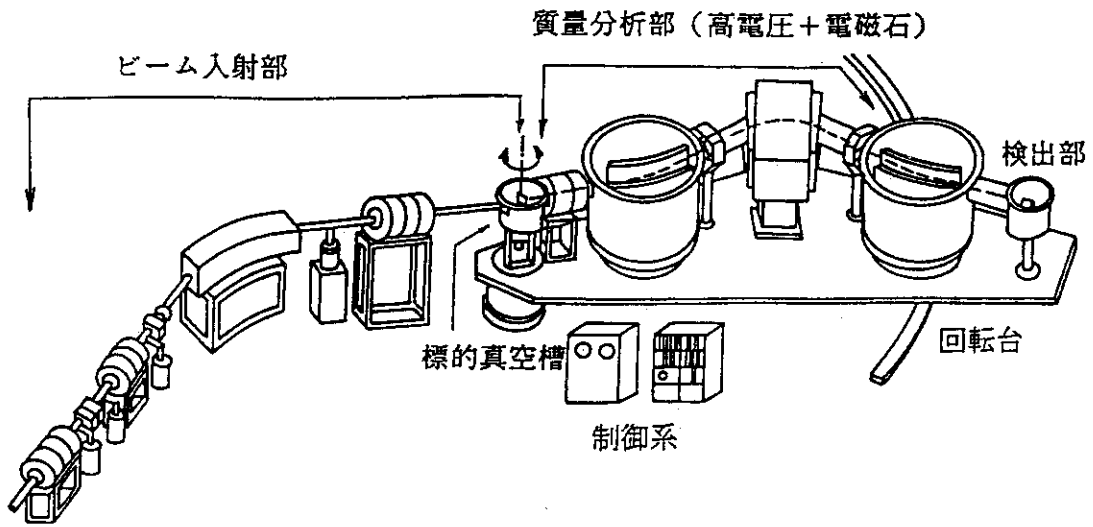


Fig. 6.1.3 反跳生成核分離装置の概略図

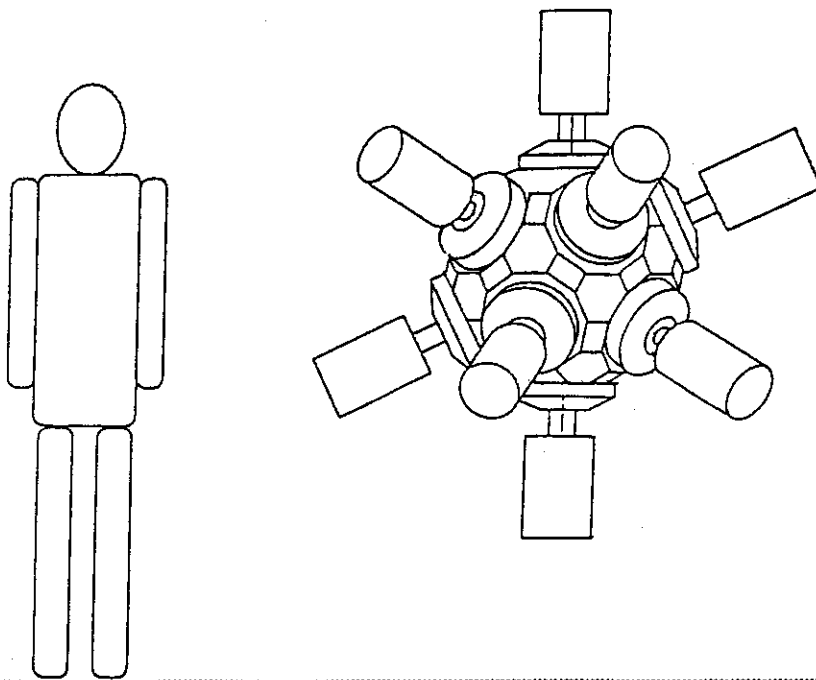


Fig. 6.1.4 ガンマ線検出器の概略図  
12台のBGOコンプトンサブレッサー部とN部ゲルマニウム検出器から構成される。



## 6. 2 ブースターを使った固体物理の研究

タンデムブースターを利用した固体物理の研究課題として、(1) 高エネルギー重イオンと結晶原子との相互作用の研究、(2) 電子励起過程による照射損傷の研究、そして(3) 励起核を利用した格子欠陥の研究等がある。

### 6. 2. 1 高エネルギー重イオンと結晶原子との相互作用の研究

この研究は、高エネルギー重イオンから得られる多価イオンと結晶原子との衝突過程、特に結晶格子配列の間隙をイオンが通り抜けるチャネリング過程に着目している (Fig. 6. 2. 1)。入射イオンが結晶のチャネルを通り抜ける際発する光子および電子の同時測定により、イオンの励起および電子移行過程を詳細に観察することができる。多価イオンが結晶の周期場によって励起される現象 (オコロコフ効果、Fig. 6. 2. 2) および多価イオンと原子との2体衝突の際観測される励起と電子移行との同時進行過程等の研究を計画している。

### 6. 2. 2 電子励起過程による照射損傷の研究

高エネルギー重イオンによる高密度電子励起が照射損傷の生成および回復過程に顕著な効果を及ぶことをこれまでの実験から明らかにした。ブースターからのさらに高いエネルギーのイオンを用いることによって高密度電子励起過程を明確に捉えることができる。更に、高エネルギー重イオン照射によって生ずる円柱状欠陥が高温超電導物質の臨界電流密度向上に最も有効であることをタンデム加速器を用いた実験で示した (Fig. 6. 2. 3)。この円柱状欠陥は電子励起過程によって生成されるので、ブースターを用いることによって厚い単結晶での磁束と欠陥との相互作用の研究が可能となる。

### 6. 2. 3 励起核を利用した格子欠陥の研究

タンデムブースターによって加速した重イオンを金属膜に照射することによって、短寿命のクーロン励起核を生成することができる。この励起核を試料中に打込み、放出するガンマ線の時間分割測定から格子欠陥生成過程を時々刻々追跡することができる。

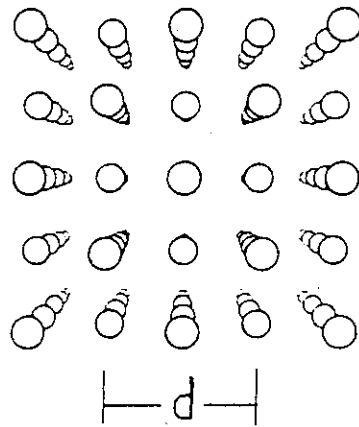


Fig. 6.2.1 結晶（面心立方）の模式図  
格子の間にイオンを通過させる（チャネリング）。

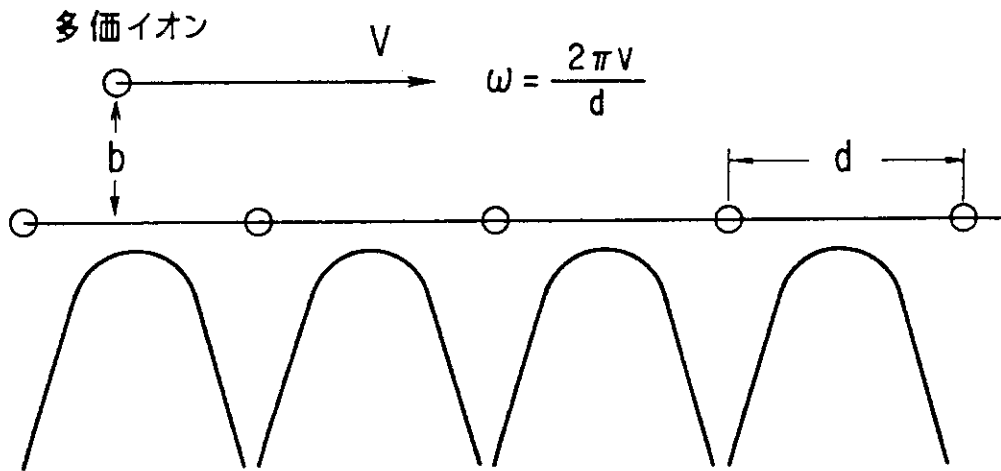


Fig. 6.2.2 結晶の周期場に沿って走る多価イオン

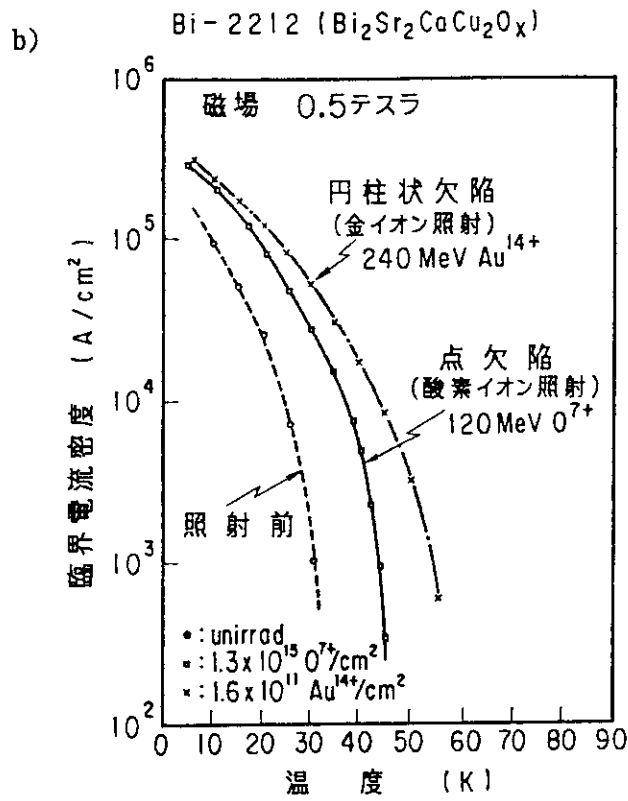
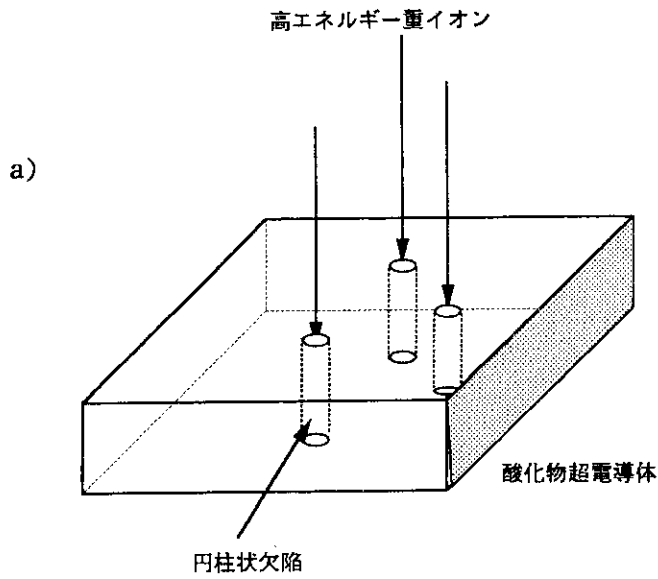


Fig. 6.2.3 高エネルギー重イオン照射による高温超電導物質の円柱状欠陥生成と臨界電流密度の向上

- a) 高温超電導物質に高エネルギー重イオンを照射すると円柱状の欠陥が生成される。この円柱状欠陥が臨界電流向上に有効であると考えられる。
- b) タンデム加速器で  $240 \text{ MeV Au}^{14+}$  および  $120 \text{ MeV O}^{7+}$  イオンをビスマス系銅酸化物超電導物質に照射したときの臨界電流密度の向上。

## 7. おわりに

タンデムブースターの開発と建設には、1984年（昭和59年）の超電導空洞の基礎開発開始から数えて1995年（平成7年）の実験開始に至るまで、11年にわたる期間を費やした。これは建設に至る前の要素開発が長かったことと建設開始後の予算スケジュールが延びたことによる。反面、目的の一つとして掲げた自力開発による技術の蓄積には十分な目的を達成することができた。世界第一級の性能を目指してきただけに、完成後の性能が時代遅れたにならずに済んだのは僥倖である。今後は効果的な運用を行い、利用者と共に一日も早く世界的な研究成果を生み出すことが我々に課せられた使命である。

このプロジェクトの発案者であり計画立ち上げを行った鹿園理事（元物理部長）、計画の実行に尽力された石井研究主幹（元物理部長）、共同で開発作業を行った先端基礎研究センター重イオン未知重核研究グループの方々、超電導空洞開発と製作に協力して頂いた技術部工作課及び三菱電機株式会社、ヘリウム冷却系の製作を担当した日本酸素株式会社、また多方面にわたるご協力を頂いた関係各位に深く感謝する。

本報告書の執筆は下記の分担で行った。安全系の放射線遮蔽計算および被曝評価計算では研究開発課市川進一氏のご指導を頂いた。

1. 小林千明
2. 1 竹内末広、石井哲朗、大内 勲、荘司時雄、花島進
2. 2 吉田 忠、金沢修平
2. 3 阿部信市、堀江活三、月橋芳廣
3. 神田 将、月橋芳廣、田山豪一、石崎暢洋
4. 金沢修平、月橋芳廣
5. 竹内末広、吉田 忠
6. 池添 博、数又幸生
7. 小林千明