

JAERI-Tech
99-066



JP9950601



負イオン源セシウム導入装置用マーカー磁石付
フロートを利用した液面レベル測定手法の開発

1999年9月

伊藤孝雄・山崎晴幸・薄井勝富
藻垣和彦・栗山正明

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。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

負イオン源セシウム導入装置用マーカー磁石付フロートを利用した
液面レベル測定手法の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

伊藤 孝雄・山崎 晴幸・薄井 勝富
藻垣 和彦・栗山 正明

(1999年7月30日受理)

JT-60 負イオン NBI (N-NBI) のイオン源では負イオンの生成率を上げるためイオン生成部にセシウム蒸気を導入している。このセシウムの蒸発率はセシウム導入装置の液体セシウムを貯めているオープン内の温度を変えることにより制御される。オープン内のセシウム残量を監視するため、サマリウムコバルト系永久磁石を装着したフロートを利用したセシウム液面レベルの測定手法を新たに開発した。オープン内のセシウム液面レベルはフロート内磁石からの磁場を測定することにより検知できる。また、このフロートはセシウム導入装置の高真空及び高温の環境下で使用できる。本液面レベル測定手法の有効性は、実証試験により確認され、これにより、負イオン源におけるセシウム消費の定量的な把握が可能となった。

**Surface Level Measurement Method of a Liquid Cesium with Float with Marker Magnet
for Cesium Feeding System in the Negative Ion Source**

**Takao ITOH, Haruyuki YAMAZAKI, Katsutomi USUI,
Kazuhiko MOGAKI and Masaaki KURIYAMA**

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

(Received July 30, 1999)

Cesium (Cs) vapor is injected into a negative ion source for the JT-60 N-NBI to enhance the negative ion production rate. The Cs vaporization rate is controlled by changing the temperature of an oven where liquid cesium is stored in a cesium feeding system. To monitor the liquid cesium surface level in the oven, a new method using a float equipped with a small Sm-Co-type permanent magnet has been developed. The liquid cesium surface level in the oven is able to be detected by measuring a magnetic field of the permanent magnet in the float. The float is available under the conditions of high temperature ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) and ultra-low vacuum pressure in the oven. The effectiveness of this method was confirmed by the experiments with a test stand. The consumption of cesium in the negative ion source in the beam injection can be precisely estimated by this measurement method.

**Keywords : Cesium Gas, Negative Ion Source, N-NBI, Cesium Feeding System,
Sm-Co-type Permanent Magnet, Float**

目次

1. はじめに	1
2. マーカー磁石付フロート	2
3. 検証試験	2
3.1 試験装置及び試験条件	2
3.2 試験結果及び議論	3
4. 結論	4
謝辞	5
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Float with Marker Magnet	2
3. Verification Test	2
3.1 Apparatus and Condition for the Test	2
3.2 Results and Discussions	3
4. Conclusion	4
Acknowledgments	5
References	5

This is a blank page.

1. はじめに

JT-60 用負イオン中性粒子入射加熱装置(以後 N-NBI 装置と記す。)はエネルギー500keV、パワー10MW の中性粒子ビームを JT-60 プラズマに入射する装置である¹⁾。本 N-NBI 装置の負イオン源は、第1図に示すように負イオンビームの種となるプラズマを発生する負イオン生成部と負イオンビームを引出し加速するイオンビーム加速部から成る²⁾。この負イオン源では11MW のパワーを得るために、22A の負イオンビームを500kV で加速している。負イオン生成部では、負イオンは体積生成と表面生成の2つの方式で生成される。このうち表面生成に対しては、その生成効率を向上させるためにセシウムをアークチェンバーに導入している³⁾。負イオン生成に対するセシウムの効果は、負イオンビームの加速電流(以後単に加速電流と記す。)から判断でき、セシウムの効果が無くなると加速電流は $1/4 \sim 1/5$ に低下する⁴⁾。このため、負イオン源のアークチェンバー内のセシウム量は常に一定に保たれている必要がある。

セシウムは融点 28.5°C のアルカリ金属である。このため、セシウムは負イオン源に取り付けられたセシウム導入装置で蒸発させて負イオン生成部に導入される。セシウム導入装置の概略を第2図に示す⁵⁾。セシウム導入装置はオープン、手動バルブ、圧空バルブ及び導入管から構成される。オープンではセシウムを貯蔵するとともにこれを加熱して気化させている。手動バルブは、セシウムをオープンに新たに充填した後に負イオン源に取り付けるまでの間、空気を遮断してセシウムの酸化を防止する目的で設置されている。圧空バルブは負イオン源運転中セシウムの導入を緊急に停止するためのものである。導入管はセシウム蒸気を効率よく負イオン生成部に導く役割を持つ。

負イオン源の運転では、セシウム効果により一定値以上の加速電流を維持するため、オープン内のセシウム残量の把握は重要である。しかしながら、これまでは、オープン内のセシウムの有無を確認する手段が無かった。このため、JT-60 の実験途中に加速電流が低下し、初めてオープン内のセシウムが空であることが判明して、実験を滞らせることが度々生じた。また、この加速電流の低下が、オープン内のセシウムが空になったため生じたものか、セシウムと何らかの理由によってオープン内で増加した酸素または水との反応によりセシウム効果が劣化したことによるものかの判別が困難であるというもう一つの問題もあった。これらの理由で、負イオン源ではセシウム導入装置のセシウムの消費量または残存量を定量的に測定可能な手法の開発が緊急の課題であった。

セシウム導入装置におけるセシウムの残量を測定する手段の開発には、次の点の考慮が不可欠であった。第一は、セシウム導入装置内はイオン源と同じ高真空であり、しかも約 180°C ~ 250°C の高温に保つ必要があると云う使用条件である。第二は、セシウム導入装置が、高真空で高温に維持されるため、SUS 製の堅牢な構造であり、全体が保温層で被覆され外部から液面等を目視できる窓を設置できない構造である。これらに加え、本開発においては、空間的制限及び温度管理状況の制限からセシウム導入装置に部品追加するような改造を避ける必要があった。検討の結果、セシウムの残量を測定する手段として、液面レベル測定用金属製のフロートをオープン内に設置

することが最適と考えられた。開発課題はフロートの位置をオープン外側から測定する方法となった。

オープン内では、セシウム蒸気がどこでも付着し電気絶縁を維持することが不可能な環境であるため、フロートの位置を電気信号に変換することが技術的に難しい。そこで、底部にキュリー温度が高いサマリウムコバルトの小さな永久磁石を装着した金属製のフロート（以後マーカー磁石付フロート記す）を開発した。本測定手法はこのフロートをオープンのセシウム液面に浮かべ、そのフロートから発する磁場をホールプローブで測定することにより液面を求めるものであり、この液面からセシウムの残量を把握するものである。

ここでは、このマーカー磁石付フロートの構造とマーカー磁石付フロートによる液面測定試験の結果を述べる。

2. マーカー磁石付フロート

このマーカー磁石付フロートを用いたレベル測定の原理を第3図に示す。セシウム液面に浮かべたフロート底部に装着した永久磁石の発生する磁場において液面高さ方向（Y方向）の成分 B_y は、第4図に示すような分布となる。この図から分かるように永久磁石の位置で B_y は0である。従って、ホールプローブをY方向に移動させて磁場の B_y 成分を測定し、 B_y が0となる点を探せば永久磁石の位置、即ち、セシウムの液面レベルが測定できる。

上記のような原理でセシウム液面が測定できるマーカー磁石付フロートを試作した。この構造を第5図に示す。マーカー磁石付フロートは、密度 1.781 g/cm^3 の液体セシウムに浮くこと、マーカー磁石付フロート内永久磁石の磁場方向が一定に保てること、及びマーカー磁石付フロート内にセシウムが溜まらないように密閉すること等に注意した。マーカー磁石付フロートは、アルミニウム製とし体積を約 1.5 cm^3 、永久磁石を含めた重さを2g前後に抑えるように設計した。フロートの密閉には高温接着剤を使用した。また、マーカー磁石付フロート底部に装着する永久磁石としてはキュウリー温度が約 820°C 、表面磁場が約0.02テスラのサマリウムコバルト磁石を用いた。

マーカー磁石付フロートによるセシウム液面レベルの精度は $\pm 1 \text{ mm}$ 以下であった。これは、ホールプローブが $\pm 1 \text{ mm}$ 移動した時バックグラウンド磁場 $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ テスラ以上の磁場変化を検出したことから判断できる。具体的に、ホールプローブは、オープンの構造で決まる磁石からの最短距離 $X = 10 \text{ mm}$ の位置で、Y方向に磁石の位置を中心に $+1 \text{ mm}$ から -1 mm へ移動すると -1.5×10^{-4} テスラから $+1.5 \times 10^{-4}$ テスラへ変化した。従って、この磁場の変化範囲内に磁場0の点、即ち、マーカー磁石位置があることが推測され、液面レベルが $\pm 1 \text{ mm}$ 以内で測定可能と判断した。

3. 検証試験

3.1 試験装置及び試験条件

マーカー磁石付フロートによりセシウム液面検出を実証するための試験装置を第6図に示す。試験装置は、真空度等の測定用ポート及び真空排気ポートを持つSUS304製の真空容器、同真空

容器及びセシウム導入装置を加熱するためのマントルヒータ、及びヒータに電力を供給し、各部の温度を監視し制御する温度コントローラから構成されている。各部の温度は熱電対により測定した。真空容器及びセシウム導入装置は、試験開始前に酸素及び水分を除去するために、300°Cまでベーキングした。真空容器及びセシウム導入装置の各部の温度は±1.5°Cの精度でフィードバック制御するようにした。

セシウム導入装置は実際の負イオン源運転に使用されているものを使ったが、圧空バルブは今回の試験に必要なので取外してある。オープンには約9gのセシウムを充填し、試作した第5図のマーカ-磁石付フロートをセシウム液面に浮かべた。マーカ-磁石付フロートがセシウム液面に浮かぶことを目視確認した。

マーカ-磁石付フロートの磁場はホールプローブ(米国 F.W.Bell 社製 Model 4048)で測定した。このホールプローブは、試験中オープンの温度が約200°Cに維持されるためオープンの近くに置くことができないので、測定の度にホールプローブをオープン近くの所定の位置に移動するようにした。この毎回の測定に際してホールプローブを同じ位置に設置できるように、ホールプローブ位置をXY平面で50 μ mの精度で設定できる2次元測定器に固定させた。この2次元測定器のX軸は同測定器に装備されている水準器で水平に合わせた。

3. 2 試験結果及び議論

オープン温度を190°Cに一定に維持した時のマーカ-磁石付フロート位置の時間変化を第7図に示す。この図から時間とともに磁石位置が下降していることが分かる。

次に、オープン温度とマーカ-磁石付フロートから測定した単位時間当たりのセシウム液面低下量の関係を第8図に示す。ここで、各測定点における横軸のオープン温度は7時間以上維持させた。この図からオープン温度が上昇するにつれてセシウム液面レベルの変化率は大きくなっており温度とともにセシウムの蒸発量が増していることが分かる。第8図をオープンの温度とセシウムの減少率との関係に変換したのが第9図である。図中の直線はセシウムの飽和蒸気圧から見積もった蒸発によるセシウムの減少率の計算値であり、飽和蒸気圧⁶⁾及びセシウム導入装置におけるセシウム通路のコンダクタンスを考慮して算出したものである。この計算においてセシウムガスの流れを分子流と仮定し、コンダクタンスにおけるガスの質量及びガスの温度による影響を無視した。実験値と計算値はかなり良く一致しており、マーカ-磁石付フロートにより測定したセシウム液面レベルは妥当であると言える。以上のことから、このマーカ-磁石付フロートによる液面レベル測定はオープン内のセシウム残存の定量的な把握に使用可能であることが実証された。

上記のマーカ-磁石付フロートの実証試験において、次のようなフロートの構造上の問題点が指摘された。即ち、フロートの密閉状態が劣化するとセシウムがフロート内に溜まり、測定ができなくなることである。このフロートの密閉性に関しては、試験中は仮処置として高温接着剤を使用した。負イオン源に実際に適用する場合には、フロートを溶接可能なSUSまたはチタニウム製にする等の改良が必要であろう。また、溶接構造とする場合、フロート内から空気がリーク

してセシウムが酸化するのを避けるため、フロート内にヘリウムガスを充填することが必要である。

4. 結論

負イオン源セシウム導入装置のオープン内のセシウム残量を評価するため、永久磁石を装着したマーカ磁石付フロートを開発し、このフロートによるセシウム液面レベルの定量的な測定方法を考案した。この方法によるオープン内のセシウム液面レベル検知の試験を行い、問題なく測定できることを実証した。これにより、セシウムの消費量が把握できるとともに、オープンの温度によるイオン源へのセシウム流量が定量化でき、セシウムの流量と負イオン電流との関係がより定量的に明かにできる見通しを得た。

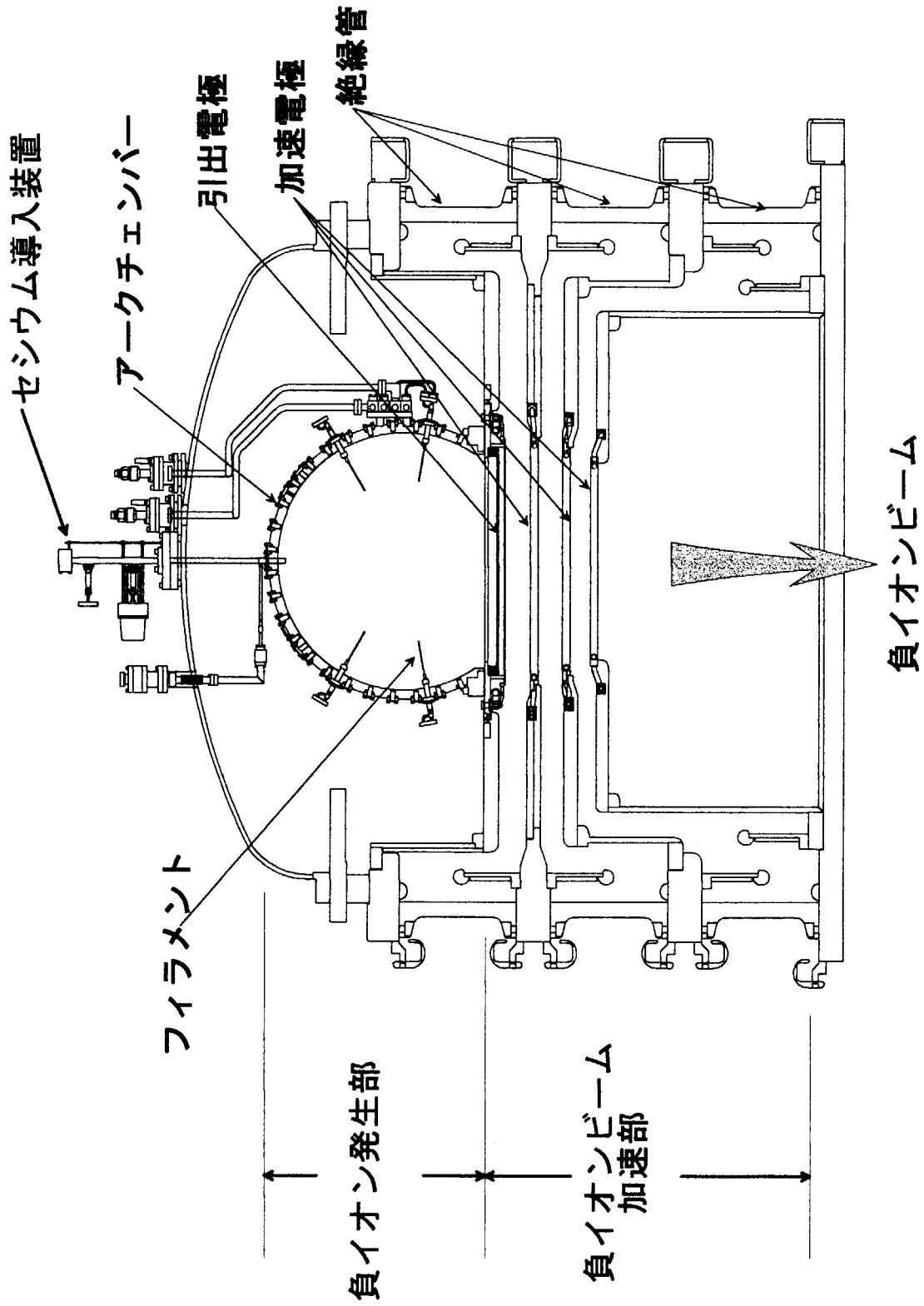
マーカ磁石付フロートの実機イオン源への適用に際し、その動作をより安定なものとするため、今後、フロートは SUS304 製かチタニウム製の溶接構造としてその密閉性を改良する予定である。また、フロート内からの残留空気リークによるセシウムの酸化を防ぐため、1気圧のヘリウムガスを充填する予定である。

謝 辞

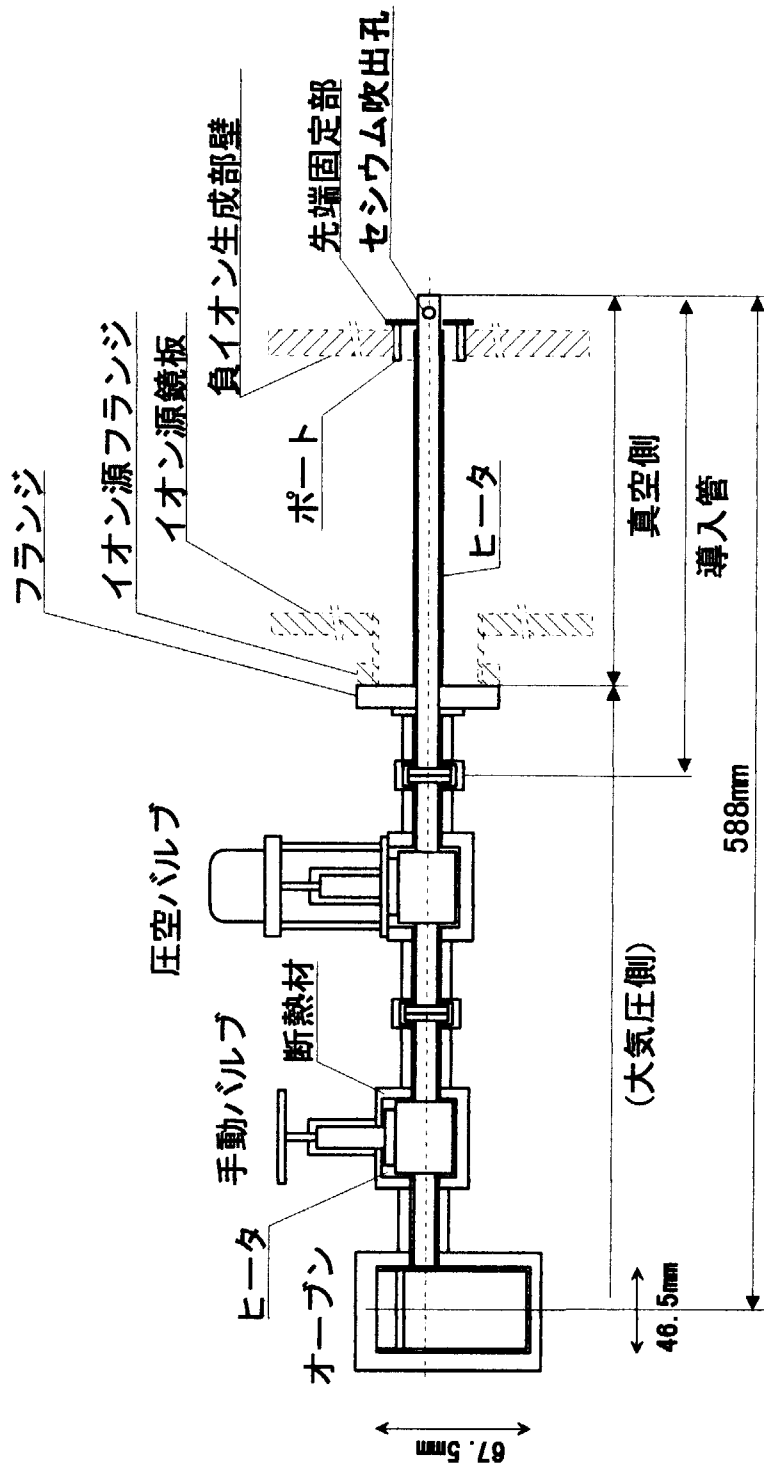
本稿をまとめるに当たり、セシウム導入装置の運転に関して議論いただいた NBI 装置試験室の皆様へ感謝いたします。試験装置の製作に関して協力や有益な助言をいただいた日本アドバンステクノロジー（株）の宇佐美広次氏に感謝いたします。また、終始激励して頂いた核融合装置試験部長の清水正亜氏、次長の木村豊秋氏に感謝致します。

参 考 文 献

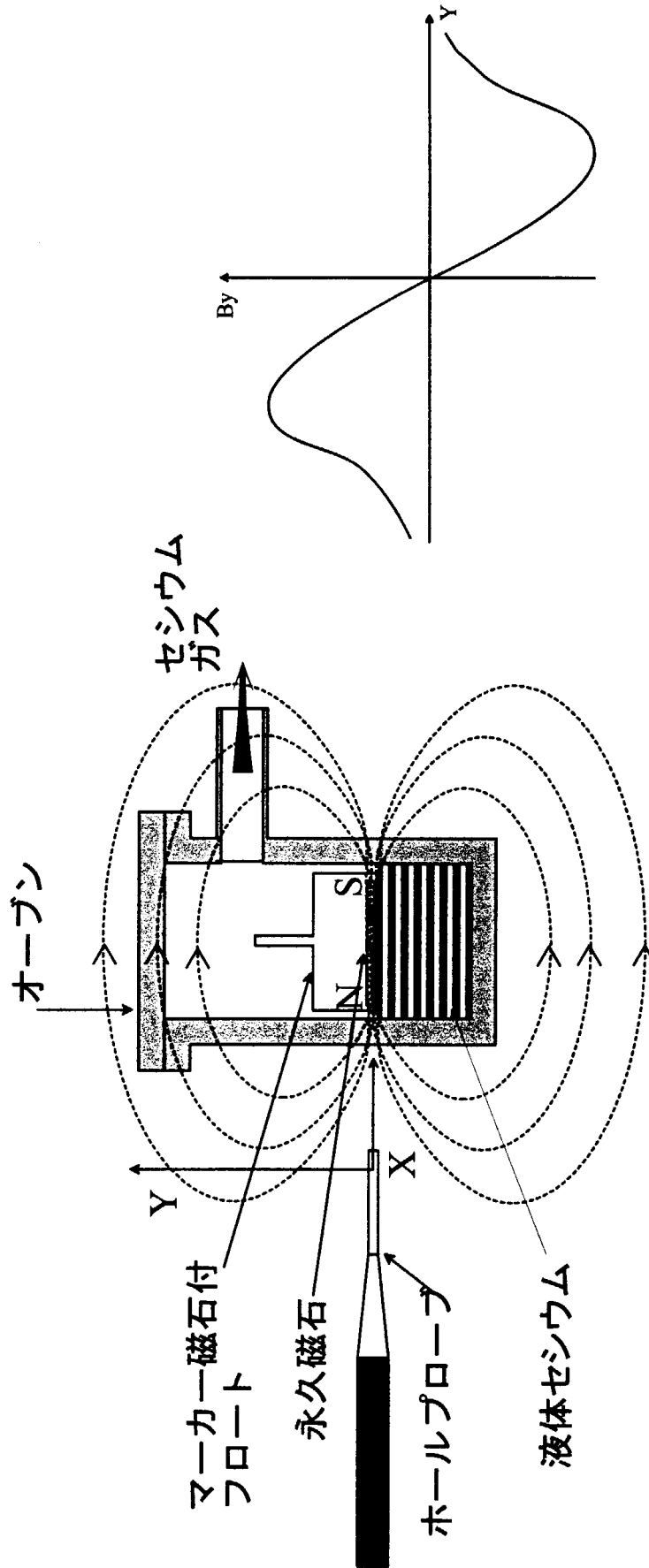
- 1) M. Kuriyama et al, "Negative-ion based NBI system for JT-60" Champaign, (1995)1,491-496
- 2) M. Mizuno et al, "Design of a 500 keV Negative-ion based NBI system for JT-60" Plasma Device and Operations, (1994)3,199-210
- 3) Y. Okumura et al, "Development of a 500 keV, 22A, D- Ion source for the Neutral Beam Injector for JT-60U" Rev. Sci. Instrum. 67 (1996)
- 4) M. Kuriyama et al, "Progress of Negative-ion based NBI system for JT-60" Proc. IEEE 20th Symp. On Fusion Engineering, Marseille, (1998)
- 5) 山崎晴幸、伊藤孝雄他 : JAERI-Tech 99-054
- 6) 日本機械学会 : 伝熱工学資料、第4版、1986年10月、p.323



第1図 負イオン源断面構造

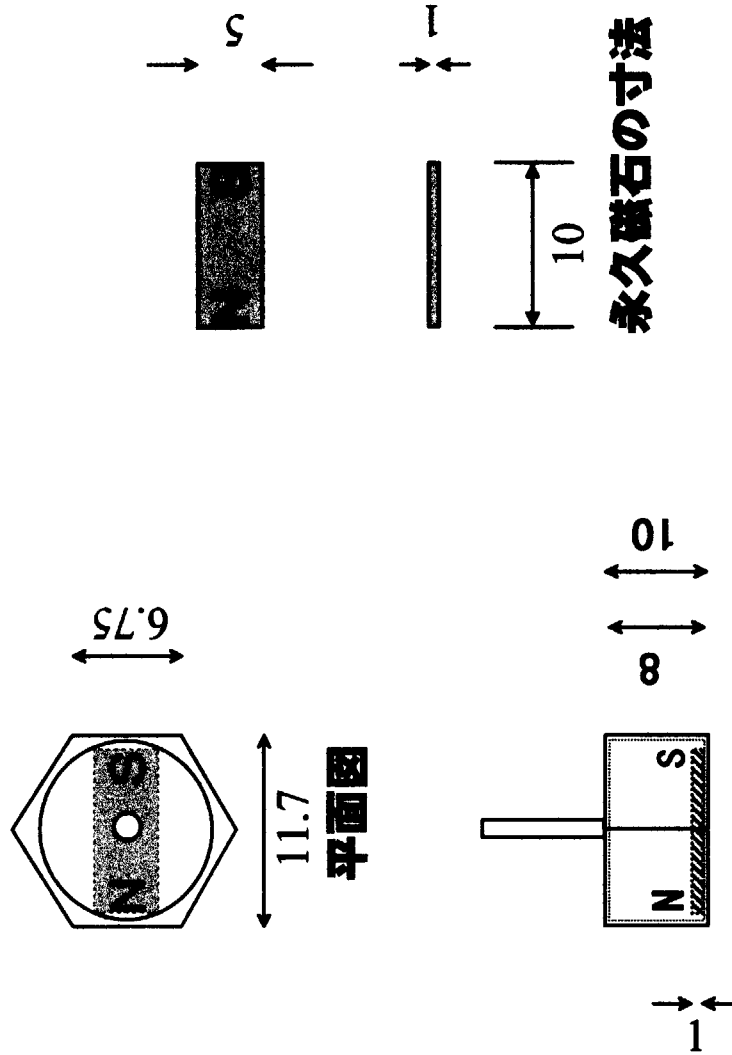


第2図 セシウム導入装置

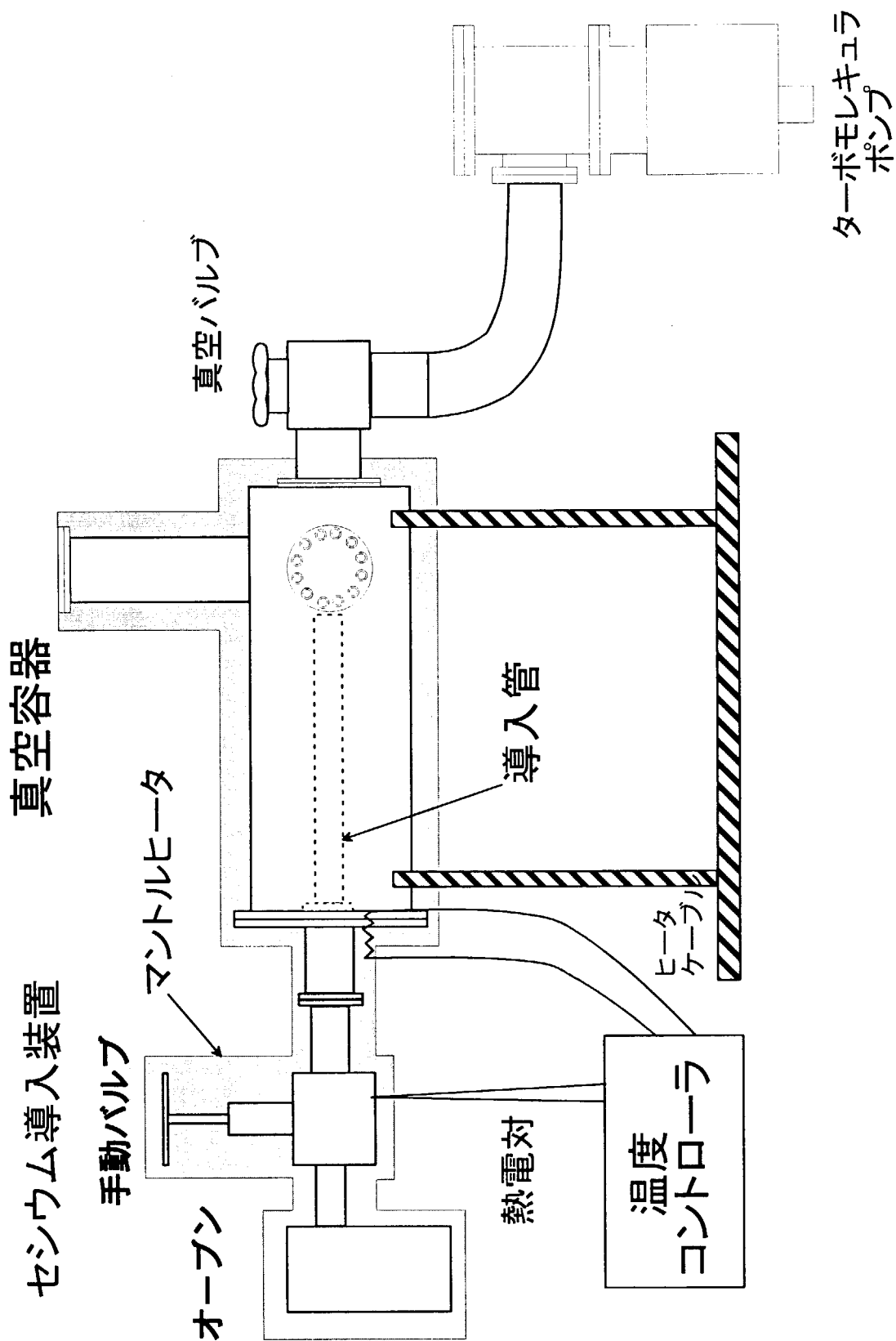


第3図 マーカ-磁石付フロートの
液面測定原理

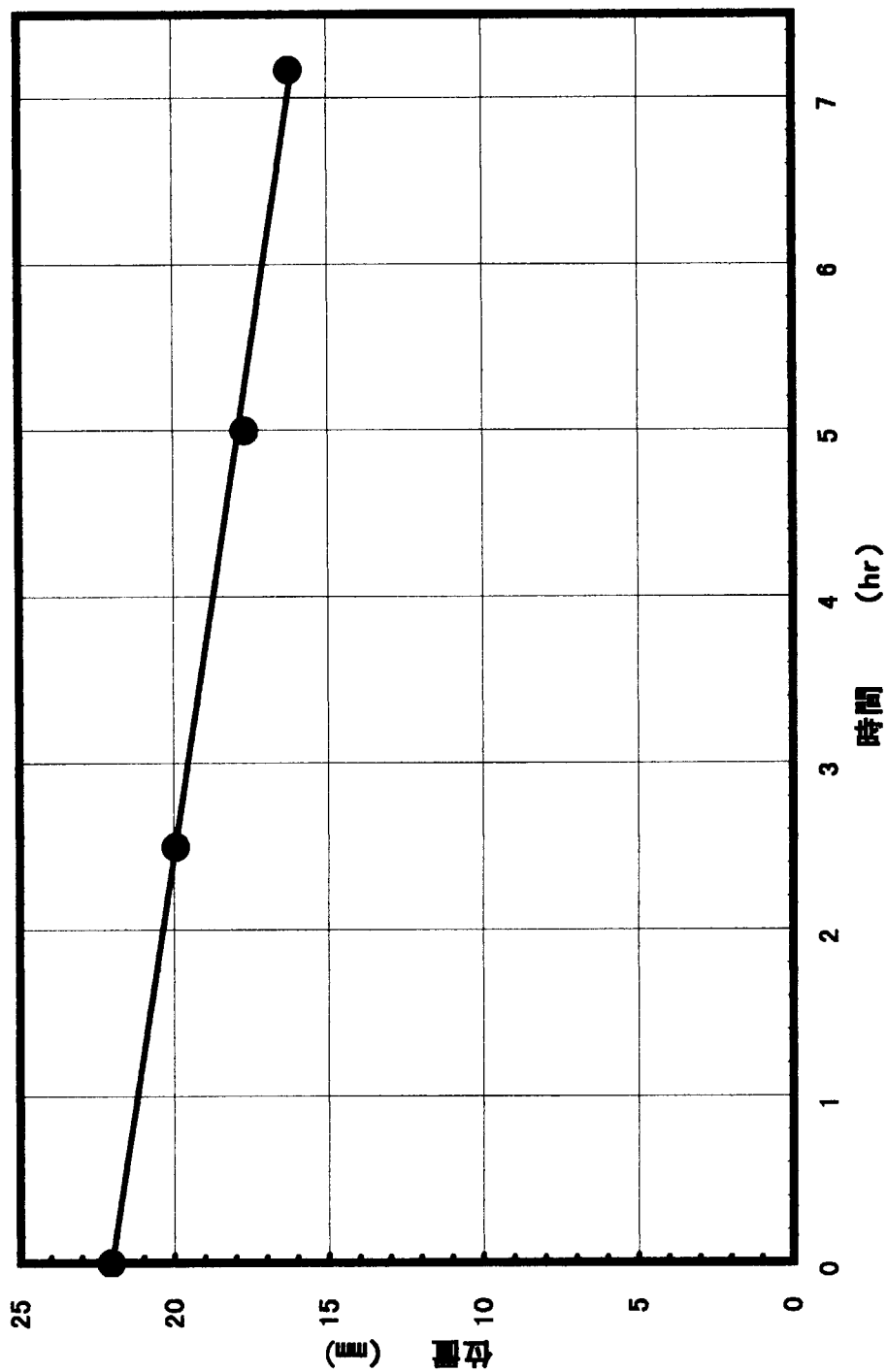
第4図 磁場成分 B_y のY方向分布



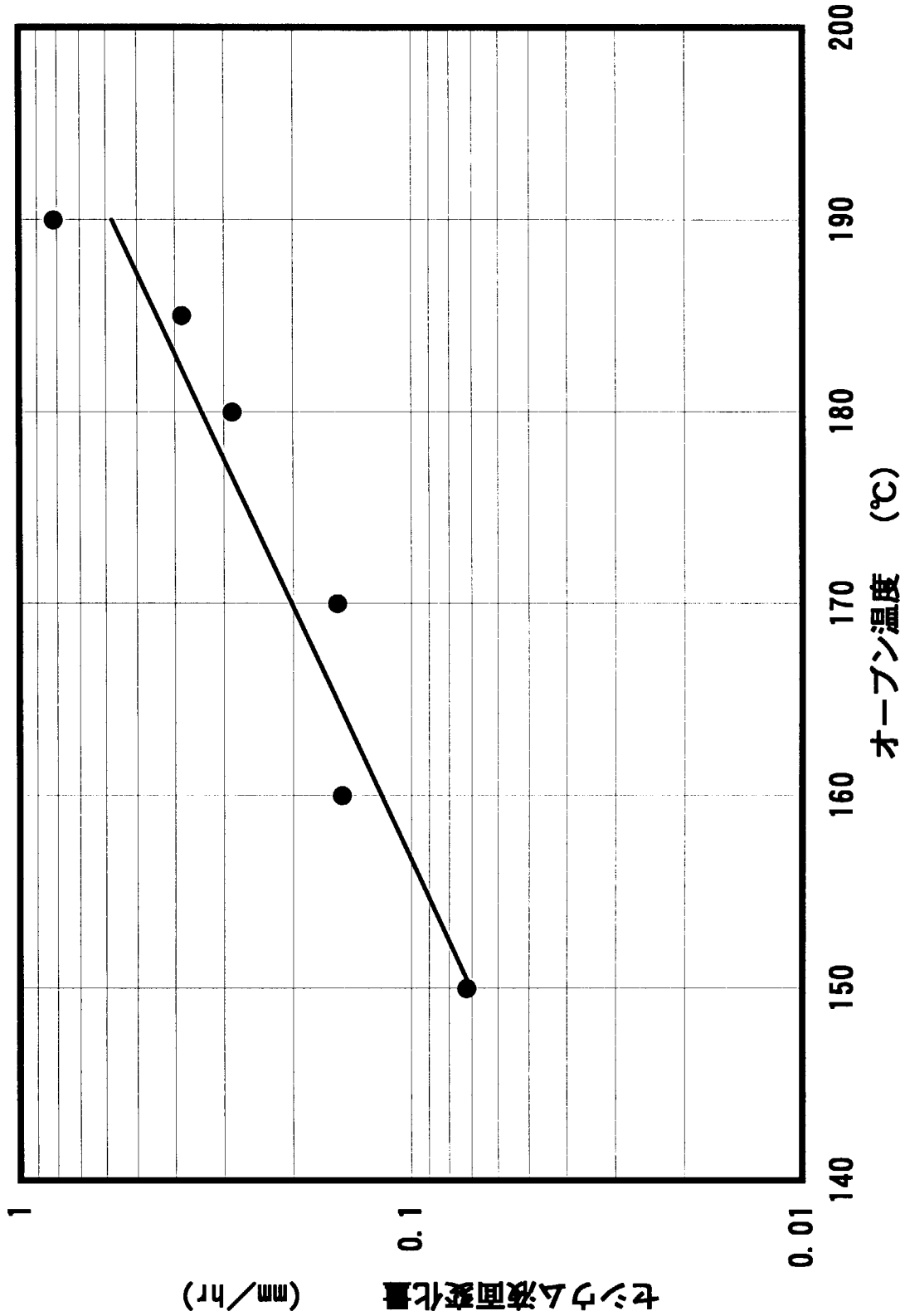
第5図 マーカー磁石付フロートの構造



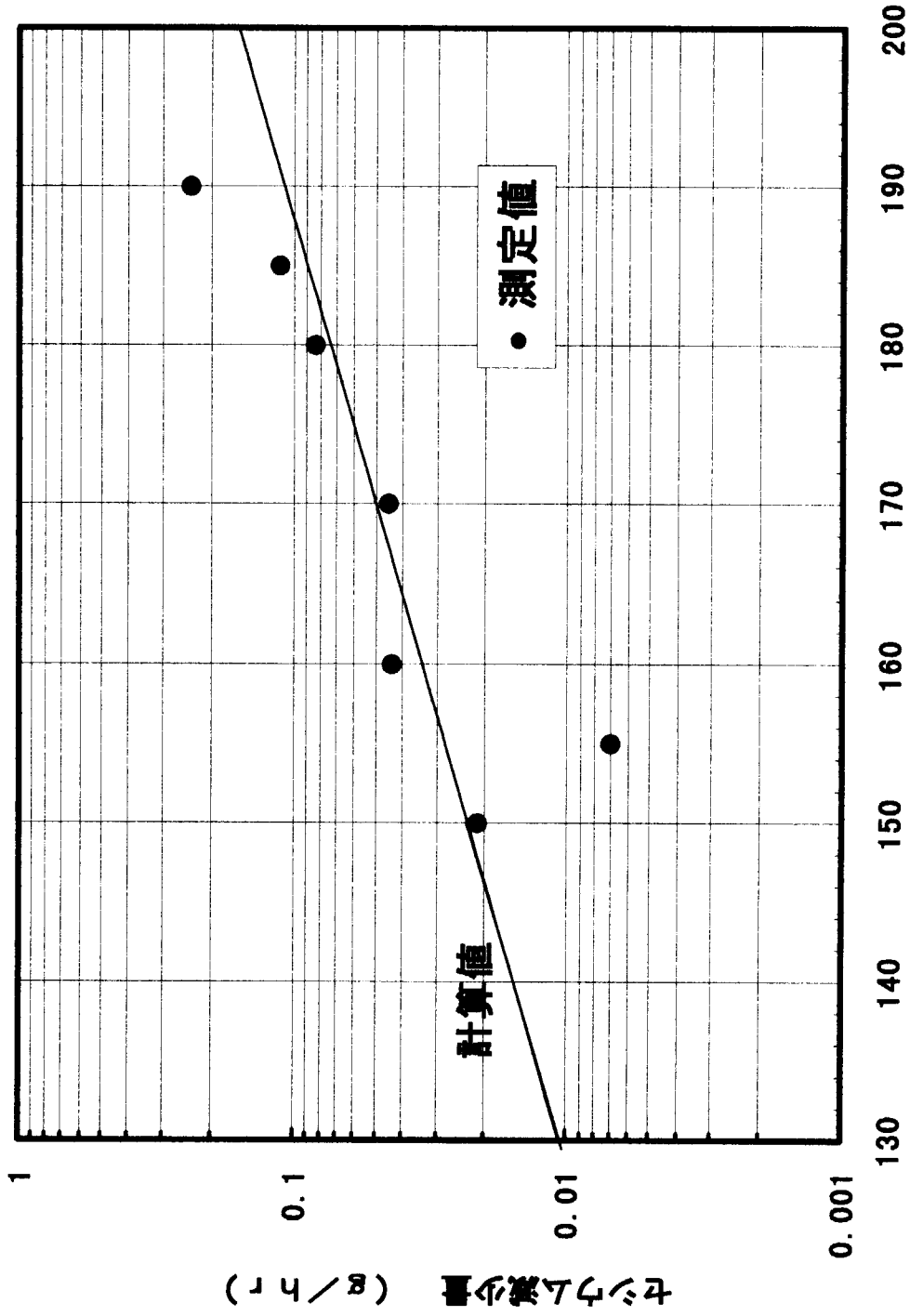
第6図 試験装置の概要



第7図 オーブンの温度190°Cにおけるフロート位置、即ち、セシウム液面レベルの時間変化



第8図オープン温度とセシウム液面低下率との関係



第9図 オープン温度とセシウム減少量

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

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

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

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

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))
 動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²³
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J(計量法)
 = 4.184 J(熱化学)
 = 4.1855 J(15 °C)
 = 4.1868 J(国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

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

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

負イオン源セシウム導入装置用マーカ―磁石付フロートを利用した液面レベル測定手法の開発