# 重イオンシンクロトロンTARN-IIの概要とその電磁石

# Outline of TARN-II and the Magnet

最近,加速器の中で重イオンシンクロトロンの必要性が高まっているが,東京大学原子核研究所では重イオンシンクロトロンTARN-IIを計画し,そのための電磁石の一部の試作を完了した。

本電磁石は,重イオンシンクロトロン用偏向電磁石で,シンクロトロンを小型化するため,常電導磁石としては1.8Tと高磁場であることに特徴がある。

本特徴を達成するため構造としては、ラウンドエッジを最適化した磁極構造、磁気力による変位の低減及び軽量化を図ったH形構造を採用し、寸法的にも精度よく製作した。工場内試験で寸法測定、コイル絶縁試験、抵抗インダクタンス測定、冷却水圧損測定などを実施し、その良好性を確認した。

野田 章\* Akira Noda 鈴木登夫\*\* Takao Suzuki 八坂保弘\*\* Yasuhiro Yasaka

## ■ 緒 言

高エネルギー加速器としては、文部省高エネルギー物理学研究所トリスタン計画などの電子加速器、同研究所プロトンシンクロトロンなどの陽子加速器があるが、物理学の分野では陽子より重い原子核を加速する重イオン加速器も重要であり、他のビームでは不可能な新しい領域や現象の解明に適用できる。

例えば、核物理学での原子核状態の解明、原子物理学での多価イオン原子の研究、その他宇宙物理学に関する知見が得られることが期待されている。また最近応用面でも、重イオンをターゲットに衝突させて核融合を起こす慣性核融合<sup>1)</sup>や、重イオンをがんに照射して治療を行なう医療面の応用<sup>2)</sup>も注目されている。この後者の重イオンによる医療応用は、従来のγ線治療に比較して正常細胞への影響が非常に小さく、今後の治療法として、特に期待されているものである。

これら重イオンビームの生成には、従来サイクロトロンが主として利用されてきたが、高エネルギーのイオンを得るのは困難であるため、重イオンシンクロトロンが必要とされ各国で建設が計画されている³)。

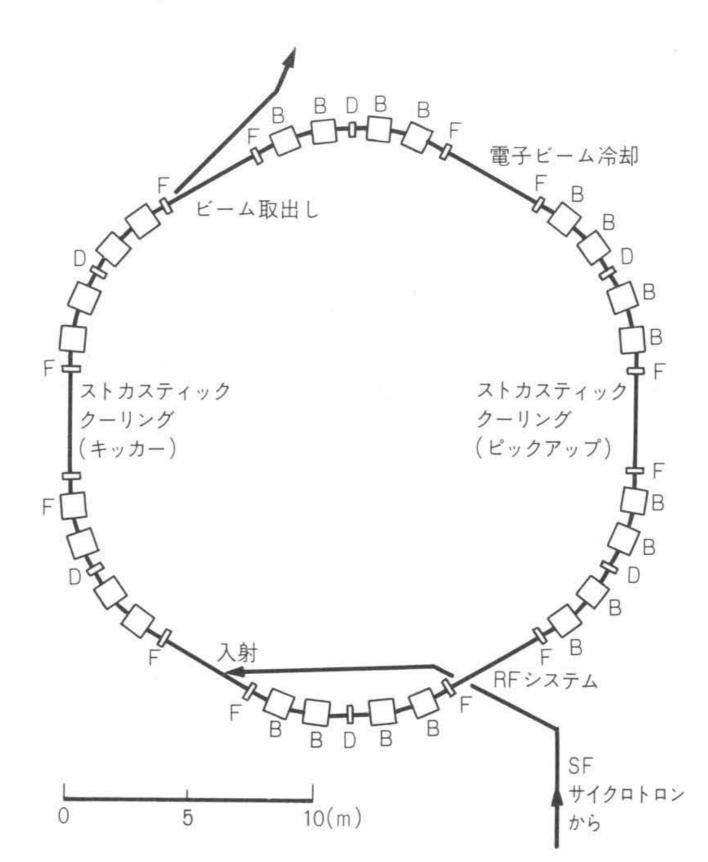
東京大学原子核研究所では、将来計画として重イオンシンクロトロンである「ニューマトロン」<sup>4)</sup>を計画しており、このための加速器の研究をTARN(Test Accumulation Ring for NUMATRON)と称する蓄積リングを用いて行ない、数々の成果を挙げている。しかし、TARNは直流電磁石で製作されている関係上、シンクロトロン加速の実験ができないこと、及び電子ビーム冷却(電子ビームを用いて、イオンビームの運動量の広がり及びエミッタンスを小さくして、ビームの質を向上させること)を行なう直線部が十分にないことから、既設のTARNを改良したTARN-IIが計画されている。日立製作所では、このTARN-II用偏向電磁石の試作開発を受注し、先般完成納入した。

本論文では、このTARN-IIプロジェクトの概要と、その偏向電磁石の設計製作及び試験結果について述べる。

## 2 TARN-Ⅱの概要

TARN-IIは,前に述べた既設TARNの実績の上に立って, その性能の拡大,向上により,将来の原子核物理学研究の発 展と、医療用をはじめとする実用重イオン加速器技術の確立を目的として、計画された重イオンシンクロトロンである。 TARN-IIのシンクロトロンの基本配置を図1に、その諸元を表1に示す。

TARN-IIでは交流磁場発生のため積層鋼板を使用した偏向電磁石を使用し、同時に、電子ビーム冷却の実験も可能なように十分な直線部が設けられている。ビームは、既設のSFサイクロトロンから、この平均半径12mのシンクロトロンに入射し、陽子で1、300MeV、イオン荷電数と質量数の比が0.5の重イオンで核子当たり450MeVまで加速される。リングのラティス構造は、超周期性(スーパーピリオド)が6であり、各周期ブロックは、偏向電磁石4個、収束用四極電磁石2個、



略語説明 B(偏向電磁石), F[四極電磁石(収束用)], D[四極電磁石(発散用)]

図 I TARN-II の基本構造 TARN-II のラティス構造は、基本的な周期数(スーパーピリオド)は6で、十分な直線部をもっている。

<sup>\*</sup> 東京大学原子核研究所 理学博士 \*\* 日立製作所日立工場

表 I TARN-II の諸元 TARN-II は、重イオンを核子当たり450MeVまで加速し、ビーム冷却が可能なシンクロトロン加速器である。

項目	<b>仕</b> 様	
最大ビームエネルギー	H $^+$ I,300MeV Ne $^{10+}$ ( $arepsilon=rac{1}{2}$ ) 450MeV/amu	
最 大 磁 場	1.8T	
平 均 半 径	12.0m	
曲率半径	3.82 m	
スーパーピリオド	6	
直線部の長さ	4 m	
繰 返 し 率	0.5Hz	
真 空 度	I×IO-10 Torr 以下	
ビームクーリング装置	ストカスティッククーリング 電子ビームクーリング	

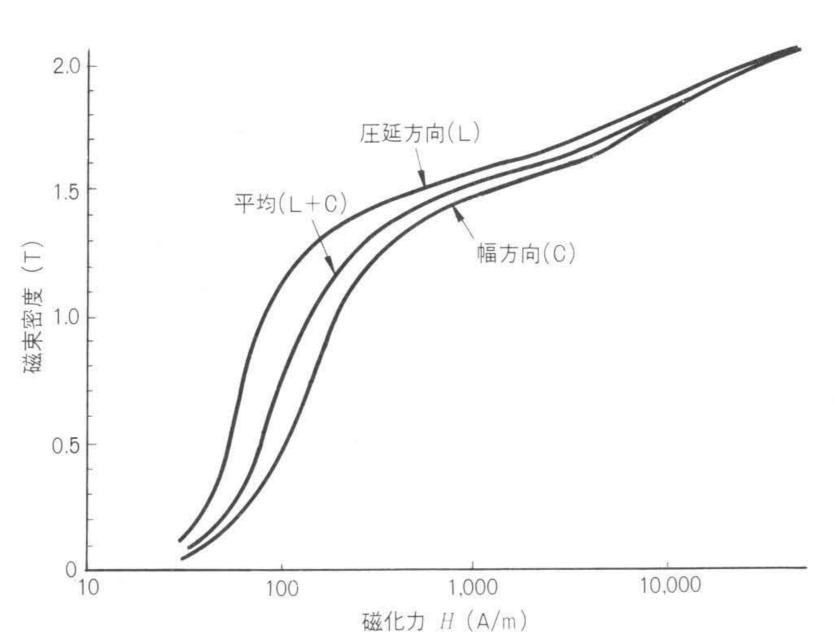


図 2 偏向電磁石用鉄板の磁気特性 磁気特性は, 4,000A/mで, 1.66 T以上の特性をもっている。

発散用四極電磁石が1個で構成されている。この偏向電磁石は、リングの小型化を図るため、1.8Tの磁場を発生させ、加速運転は0.5Hzで繰り返される。

# 3 電磁石

# 3.1 偏向電磁石の設計

電磁石の設計に当たっては、最大磁場が1.8T,有効磁場領域が幅200mm,高さ55mmということで設計を行なった。まず、基本構造としては構造的に強固であること、高磁場で4極、8極成分が出にくいこと、本電磁石の仕様に対しては重量が軽く経済的に有利であることから、H型を採用した。

また鉄心の材質については、高磁場での磁化力が小さいものが好ましいが、同時に鉄損が小さいこと、磁気特性のばらつきが小さいこと、及び経済性を考慮する必要がある。これらの諸条件を考慮して、今回は無方向性の冷間圧延ケイ素鋼帯(JIS S23相当)を採用することとした。今回使用したケイ素鋼板の磁気特性を図2に示す この磁気特性をもとに、東京大学原子核研究所で磁場計算を行ない最適形状を求めた。本計算は、軌道方向に対し垂直方向の断面に基づいた2次元の計算であるが、ラウンドエッジ50及びエッジ部のわずかな(約0.5mm)突き出し(シム)により、入射時の低磁場(~1kG)から最大励磁時の高磁場(18kG)に至る広い磁場範囲で

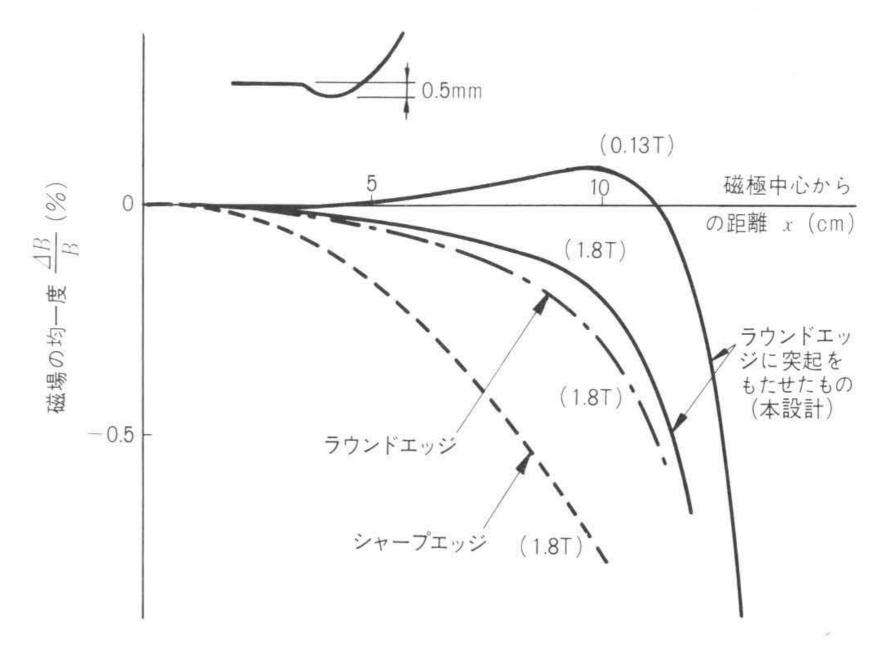


図3 高磁場での磁場の均一度 高磁場の均一度を保つため、ラウンドエッジに突起をもたせたものが最適である。

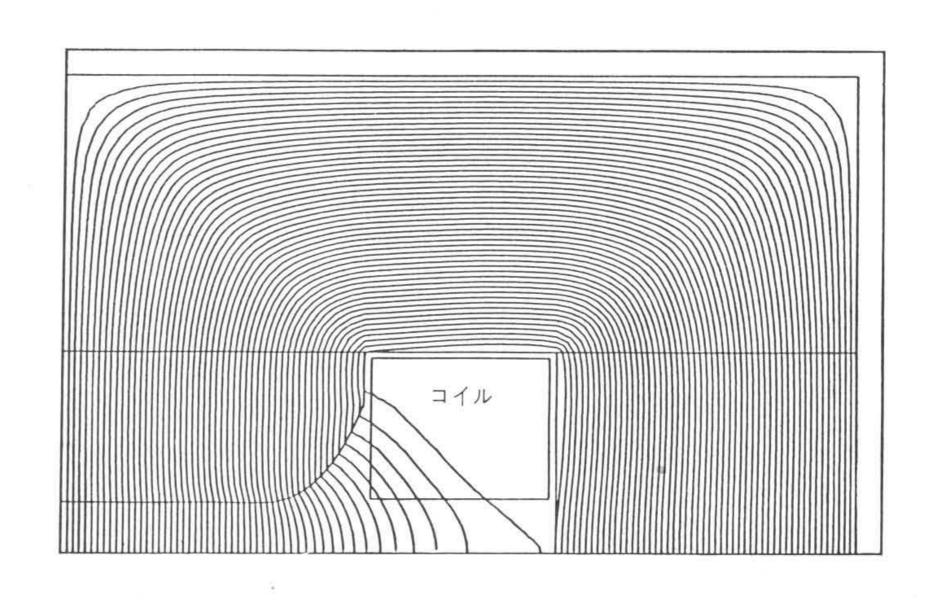


図 4 偏向電磁石の磁力線図 磁力線密度から,磁極部の一様性が確認できる。

の一様性を追求した構造となっている。東京大学原子核研究 所で計算された磁場分布と、最終磁極形状の磁力線のプロットを図3及び図4に示す。

また, 軌道方向端部については, ロゴスキー形状(端部の磁場分布を滑らかにかつ励磁レベルの差による磁場分布の変化を低減させるために, 曲線的に変化させた磁極形状<sup>6)</sup>)を3ステップで近似する階段式の鉄心形状とした。更に鉄板端部の変形を抑えるため, 階段部にセラミック製のピースを突き当てて, 積層鉄心の広がりを抑える構造としている。

鉄心ギャップ部に働く磁気力は、磁束密度が高い本電磁石の場合、問題となる可能性がある。この磁気力による変形、応力を調べるため強度計算を実施した。計算は磁極表面に電磁力を加え、適切な境界条件を与えて有限要素法構造解析プログラムにより計算した。結果を図5に示す。同図には変形図と磁極変位の幅方向分布を示してある。本計算では、鉄心組立合せ部の端部を固定するという境界条件であるため厳しい側の評価であるが、最大変位は24μm、変位のばらつきは約2μmであり、磁場への影響は小さく問題はない。

コイルについては、最大磁場を発生させるための起磁力  $1.45\times10^5 \mathrm{AT}$ に対応し、ターン数40、最大電流3、600Aとした。 主コイルの導体としては、外形寸法として23.5mm×24mmでで中空( $\phi$ 11)の無酸素銅導体を用い水冷却としている。 構造

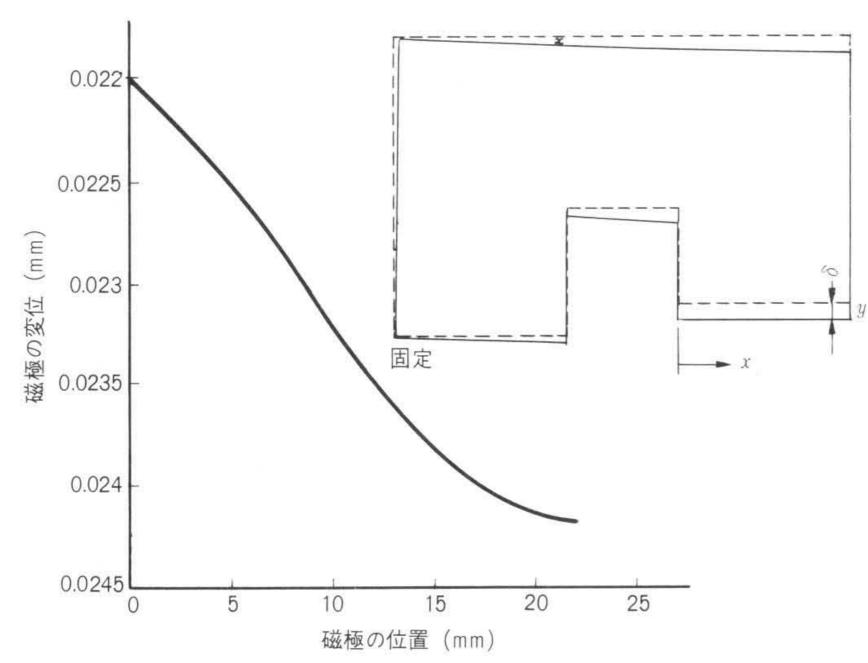


図5 磁極の変位 磁気吸引力が加わったときの磁極の変位は24µm, 磁 極面当たりのばらつきは2μmと小さい。

表 2 偏向電磁石の諸元 I.8Tの高磁場を生成するため、コイル、鉄心 の設計諸元である。

区分	項目	仕 様	
+	中心磁場	1.8T	
基一	有 効 領 域	$200 \times 55  \text{mm}^2$	
本	起 磁 力	1.452×10 <sup>5</sup> AT	
性 - 能 -	インダクタンス	10 mH	
	コイル抵抗	6.4 mΩ	
コイル	ターン数	40ターン	
	電流	3,600 A	
	冷 却 回 路	4 回路並列	
鉄	外 形 寸 法	幅I.16m×長さ1.05m×高さ0.76m	
	磁極間距離	80 mm	
	材質	ケイ素鋼板	
	板厚	0.5 mm	
	構造	上下 2 分割方式	
補正コイル	ターン数	20ターン	
	起 磁 力	$1 \times 10^3 AT$	
	電流	50 A	

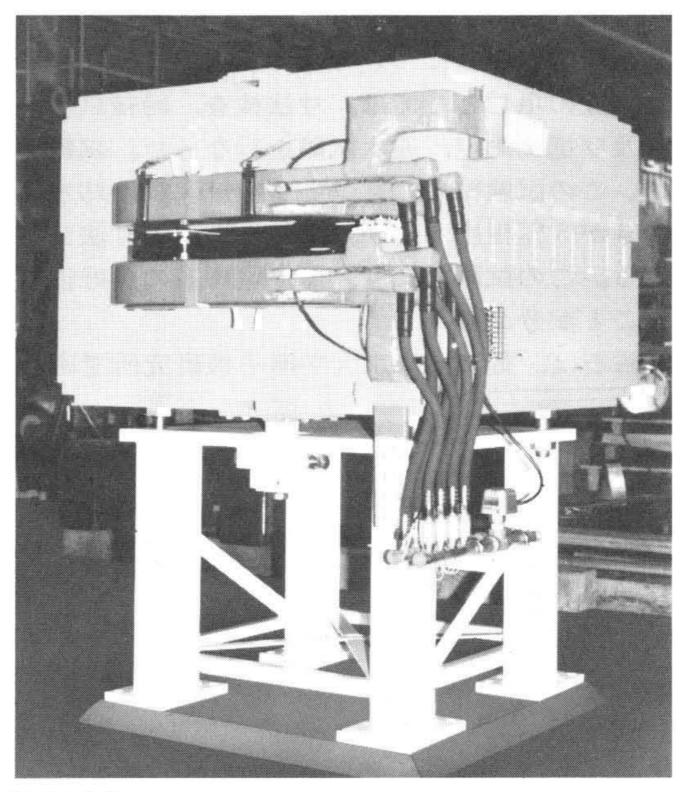
としては、4ダブルパンケーキで構成し、それぞれのダブル パンケーキには,並列に4系統,水を流す構造としている。冷 却水の最大温度上昇幅設計値は、流量301/minで40degである。

また, 主コイルのほかに, 本電磁石には補正コイルをもっ ている。補正コイルは、電磁石の個性差の補正や使用法に応 じた補正的な磁場をつけ加えるもので, 鉄心と主コイルの間 に挿入される。補正コイルは、外形寸法が4mm×7.5mmの 二重ガラス巻電線を用い、1極当たりのターン数は10ターン で、最大50Aまで流すことが可能なものである。

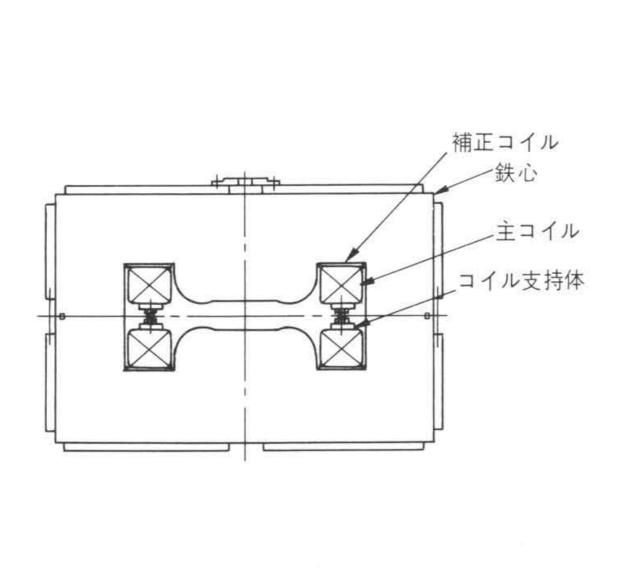
以上、鉄心、コイルの設計について記述したが、本偏向電 磁石の諸元及び外形図を表2及び図6に示す。架台は、鉄心 の上下,前後左右の調整機構をもっている。TARN-II計画で はこのような偏向電磁石を、総台数25台を製作し、うち24台 をシンクロトロンリングに、残り1台を制御モニタ用に用い、 偏向磁場の精度の良い制御が可能となる予定である。

#### 3.2 偏向電磁石の試作及び試験

偏向電磁石の試作に当たっては、特に組立時のギャップ部



偏向電磁石 製作された偏向電磁石は、幅1.2m, 長さ1.4m, 高さ 1.6mである。



(a) 断 面 図

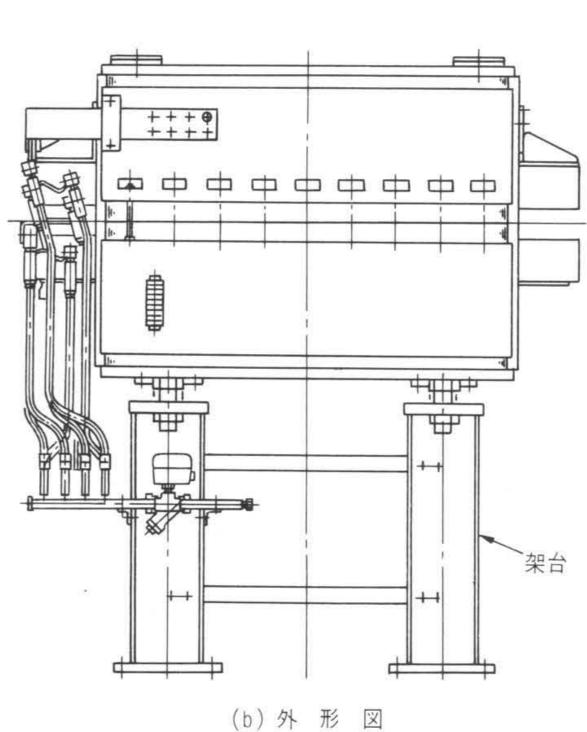


図6 偏向電磁石の外形図 と断面図 偏向電磁石はH形 の電磁石で、ラウンドエッジの磁 極形状をしている。

表 3 TARN-II 用偏向電磁石の試験検査結果 (9台分) 9台の偏向 電磁石のばらつきは小さく、十分な性能をもっている。

項	目	実測値	設 計 値
鉄 心 (公称寸法:	す 法からのずれ)	最大 0.04 平均 0.03	<0.05
絶 縁 (1,000\	抵 抗/メガー)	>2,000M Ω	>100M Ω
コイル抵抗	主コイル	6.14~6.48m Ω	6.4m Ω
(75℃換算)	補正コイル	49.5~50.2m Ω	<b>49.0</b> m Ω
インダ	クタンス	10.05~10.19mH	10.0mH
耐 電 /	王 試 験	4,500V   分間	同左
冷却水圧力抗	員失 (30 l/min)	2.55~2.85kg/cm <sup>2</sup>	$<$ 5 kg/cm $^2$
耐水儿	王 試 験	I5kg/cm <sup>2</sup> I 分間	同左

の寸法公差(±0.05mm)の管理を徹底したこと, 2分割構造であるため再組立時の精度が再現されるようキーなどを活用したことなどに留意して製作した。製作された偏向電磁石の写真を図7に示す。本電磁石の外形寸法は架台を含めて幅1.2m, 長さ1.4m, 高さ1.6mである。

製作した偏向電磁石については、工場内試験検査を実施した。試験検査の項目としては、寸法検査、絶縁試験、インダクタンス及び抵抗測定、通水試験を行なった。試験結果を表 3 に示す。この試験結果で、コイル抵抗及び冷却水圧力損失のばらつきが5%程度あるが、これは導体の寸法公差によるものである。この試験により、偏向電磁石の良好性が確認されていることが分かる。

偏向電磁石は, 更に, 東京大学原子核研究所で磁場分布の

測定を実施した $^{7}$ 。電源の関係上,現在までの測定はI=400Aと比較的低電流時の測定ではあるが,幅方向 $\pm 100$ mmの範囲で一様性の良好な磁場が得られた。高磁場での性能については,今後確認する予定である。

## 4 結 言

磁気力による変位が小さく、高磁場を発生するのに最適な 磁極構造をもつ東京大学原子核研究所TARN-II計画用偏向 電磁石を試作した。更に各種試験により、電気特性、通水特 性が所定の性能を満たしていることを確認した。

これにより、重イオンシンクロトロン用高磁場偏向電磁石の設計製作技術が確立したが、将来の各種応用加速器の需要にこたえるため今後電源、制御系を含めたシンクロトロンシステム技術の確立に鋭意取り組む決意である。

最後に、本稿をまとめるに当たり御指導をいただいた関係 各位に対し深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) Y. Fujiie, et al.: IPPJ-663(NAGOYA UNIV.) Conceptual Design of Heavy Ion Fusion Reactor (1984)
- 2) LBL PUB 5097, The Heavy Ion Medical Accelerator (1983)
- 3) LBL PUB 5081, A National Facility for Relativistic Heavy Ion Research to 10GeV per Nucleon with Uranium (1982)
- 4) Y. Hirao, et al.: INS-NUMA-5 (1977)
- 5) H. Kumagai, Nuc 1. Instr. Meth. 6 (1960) 213.
- 6) W. Rogowski, Archiv für Electrotechnik, 7 (1923) 1.
- 7) A. Noda, et al.: Orbit Analysis and Magnet Design of TARN-II, Proc. 5th Symp. Acc. Sci.&Tech, to be Published



# 静電偏向撮像管における偏向電界の解析

日立電子株式会社 奥 健太郎·日立製作所 福島正和電子通信学会論文誌 J67—C, 459~466 (昭59-5)

最近、固体撮像素子を用いたビデオカメラも普及し始めたが、走査手段として電子ビームを用いる撮像管が感度や解像度特性で優位にあるため、依然として主流を占めている。

電子ビームを磁界で集束し電界で偏向するMS形撮像管は、小形・軽量化の可能性のほかに、解像度が高く、解像度の一様性も良いことから注目され、研究・開発も活発になっている。この解像度の一様性の良さは理想的な一様電磁界を用いたMS形撮像管の電子ビーム系では偏向収差と偏向に伴うターゲットへのランディング誤差が全くないことに起因する。

しかし、実際のMS形撮像管では、理想的な一様電磁界を実現できず、偏向収差の最小化とランディング誤差を補正するためのコリメーションレンズの解析が設計技術として重要である。このためジグザク形状の偏向電極(Curved Arrowパターンヨーク)

が形成する偏向電界の3次元分布を精密に 解析し、偏向した電子ビームの正確な収差 特性を求める方法が必要になる。

従来の方法の偏向電界を一様と近似したり、あるいはHutterらの半無限円筒電極が偏向電極の両端についた系の解析では実際の撮像管のような偏向電極の両端がメッシュ電極などにより閉ざされたときの特性を論ずるには不十分である。

我々は、MS形撮像管で偏向電極の両端 が平板状電極により閉ざされた空間の電界 分布を、各電極の電位差によるレンズ効果 まで含めて精密に解く方法を確立した。

まず、ラプラス方程式の線形性を利用し 電界を軸対称成分(レンズ電界)と非軸対称 成分(偏向電界)に分ける。軸対称成分は通 常の変数分離法で求め、偏向電界は、Hutter らが定式化した無限長領域での解析を偏向 電極の両端にある電極による鏡像と重ね合 わせることで、有限空間に閉じ込める逐次 鏡像法を用いて導出する。この手法では、 実際の撮像管に必要なコリメーションレン ズの効果を含めた偏向電界が求められる。

次に、具体的な偏向系の数値解析を行ない実用性を検討した。3次元の電界分布解析でありながら、10<sup>-3</sup>の精度で偏向領域内200点の電界を求めるのにHITAC M200Hを使用した場合約1分のCPU timeで済み、実用上十分な計算速度と精度が得られた。解析結果から、

- (1) パターンヨークのジグザグ形状に対応した内部の電界が振動する状況
- (2) 管径の量以下の中心軸近傍での偏向電圧の平滑化
- (3) 両端の電極による偏向電界の短絡状況
- (4) 偏向電界と軸対称レンズ電界の重畳による複雑なコリメーション電界の分布などMS形撮像管を設計する上で重要な知見が数多く得られた。