

立体磁気軸トーラス装置「アスペレータNP-3」の建設

Construction of a Torus with Three Dimensional Magnetic Axis "Asperator NP-3"

最近、東北大学へ日立製作所から納入された核融合実験装置「アスペレータNP-3」は、3次元の磁気軸をもつ立体磁気軸トーラスであり、磁力線のねじれ(チャー)が大きく磁気井戸も深いため、プラズマ閉じ込め性能の向上が期待できる点で、世界的にも極めてユニークな構造のトーラス装置として注目されている。従来、立体磁気軸トーラスの優れたアイデアにもかかわらず、らせん状真空容器やヘリカルコイルの構造が複雑で製作技術上の困難が予想されるため、実験装置による研究はほとんどなされていなかったが、今回、本装置の設計製作に際して多くの新技術が開発適用され、これらが成功裏に解決された。

本論文ではその概要、特に2mm以下の誤差で作られた真空容器の精密製作技術、ヘリカルコイルの電磁解析技術などを中心に述べる。

長尾重夫* *Shigeo Nagao*
 渡辺博茂* *Hiroshige Watanabe*
 加沢義彰** *Yoshiaki Kazawa*
 橋本 宏** *Hiroshi Hashimoto*
 井村泰也** *Yasuya Imura*
 高橋孝夫*** *Takao Takahashi*

1 緒言

核融合プラズマの磁気閉じ込め方式には、ミラー、トカマク、ステラレータ、ヘリオトロンなど、特徴のある各種のものが提案され研究が進められている。本論文で紹介するらせん状の磁気軸配位をもつ立体磁気軸トーラスもその一つであり、早くから研究が進められ、らせん対称性の良いものについては、理論的にはほとんど完成されたものとみなされている^{1),2)}。これらの理論によれば、本方式は磁力線のチャーも磁気井戸も具備した、優れたプラズマ閉じ込めの磁界配位となる可能性がある。他の方式と比べると、例えばトカマクは対称性が良いが磁気井戸の形成を小アスペクト比に期待していて、このために技術的制約が大きいこと、及び大電流による不安定性があり限界 β 値が小さい。また、平面磁気軸ステラレータは磁気井戸の形成を小アスペクト比に期待することはトカマクと同様であるが、小アスペクト比の場合にはらせん対称性が損なわれる。また、周期数の大きい場合、磁気井戸の形成が困難である。

これに対し、立体磁気軸トーラスの場合、周期数 N (磁気軸が平均主半径の周りを周回する回数)を大きくとりアスペクト比を大きくすれば、らせん対称性は改善され、磁気井戸の形成も容易となり、高い β 値を得られる可能性がある^{1),3)}。1950年ごろ Spitzer が提案し、プリンストン大学で研究された8字型ステラレータは、周期数 $N=2$ の立体磁気軸トーラスである。東北大学では、周期数 N を10以上に選んだ3次元の立体磁気軸をもつトーラス装置を考案し、これを「アスペレータ」と呼称した。

アスペレータは、このように理論的には高いプラズマ閉じ込め性能を示唆されているにもかかわらず、実験的研究が著しく立ち遅れており、実質的には実験例は皆無に近かった。その原因の一つには、らせん状真空容器やヘリカルコイル製作上の技術的困難が挙げられる。日立製作所と東北大学は、この型の実質的な1号機ともいえる立体磁気軸トーラス装置「アスペレータNP-3」の設計製作に際して、これらの技術

的問題を一つ一つ解決して、次期中・大型装置製作の技術的基盤を確立した。本論文ではその概要について述べる。

2 装置の概要

図1に装置本体部の外観を示す。表1はその主要パラメー

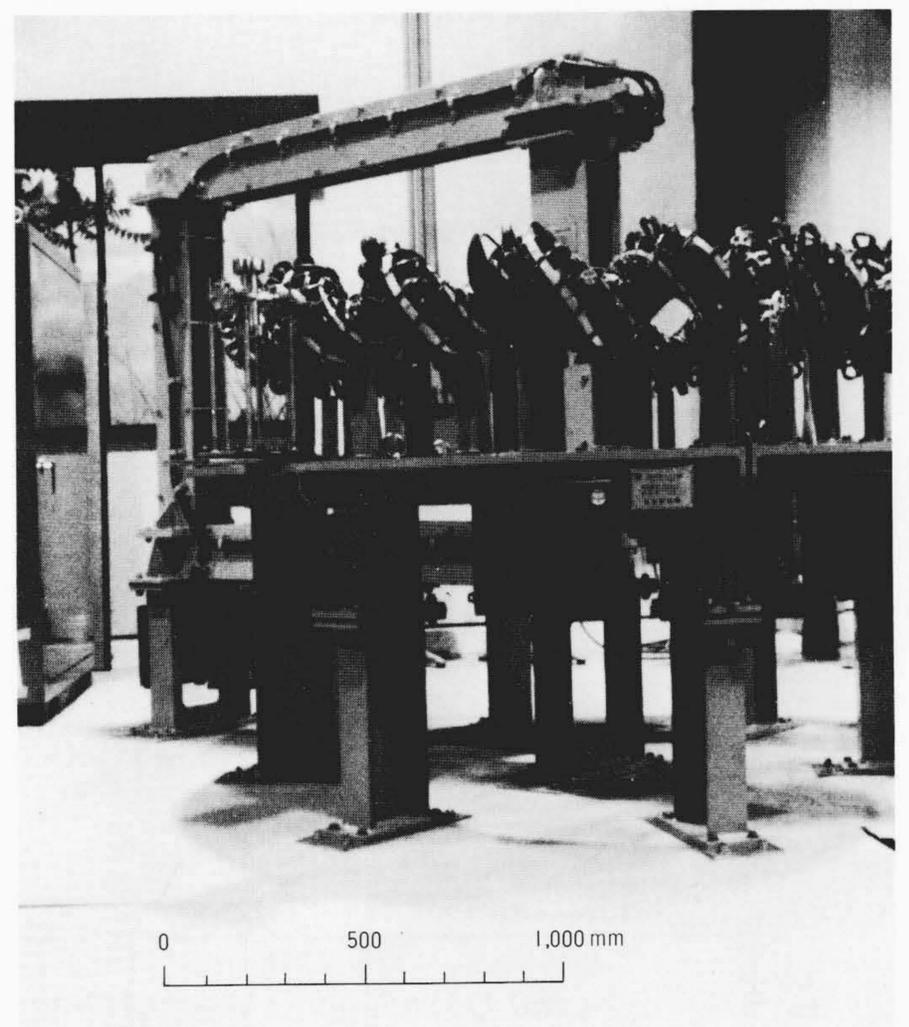


図1 「アスペレータNP-3」装置本体の外観 装置本体部の真空容器が、ヘリカル状になっているのが構造上の大きな特徴である。

* 東北大学工学部 工学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所

表1 「アスペレータNP-3」の主なパラメータ 「アスペレータNP-3」装置の主なパラメータを示す。

項 目	記 号	仕 様 数 値
平 均 大 半 径	R	0.8m
プ ラ ズ マ 断 面 小 半 径	a	0.03m
軸 ら せ ん 半 径	$r_0 = R/N$	0.05m
周 期 数	N	16
ト ロ イ ダ ル 磁 場	B_0	0.35 T
ヘ リ カ ル コ イ ル 対 数	l	2 + 3
ジ ュ ー ル 加 熱 用 磁 束	ϕ	0.03 Vs

タである。装置本体部は、(1)プラズマ閉じ込め空間を形成する真空容器、(2)真空容器の周りに巻回される主閉じ込め磁界生成用のトロイダル磁場コイル及びヘリカルコイル、(3)プラズマのジュール加熱電流を流すための鉄心形変流器、(4)ベースなどの支持構造物によって構成される。本体の周辺には、250l/sの分子ポンプを主ポンプとする真空排気装置、各種コイルを励磁するコンデンサ電源設備(図2)などが配置されている。

3 真空容器

真空容器は図3に示すように、周期数 $N=16$ のヘリカル状円形断面トラス容器である。これは、プラズマ閉じ込め磁界を形成するトロイダル磁場コイル及びヘリカルコイルの位置決め寸法基準にもなるため、高い寸法精度が要求される。容器はステンレス鋼製であるが、プラズマのジュール加熱を考慮して、トラス方向2箇所電氣的に絶縁するセラミックブレイクを設けている。

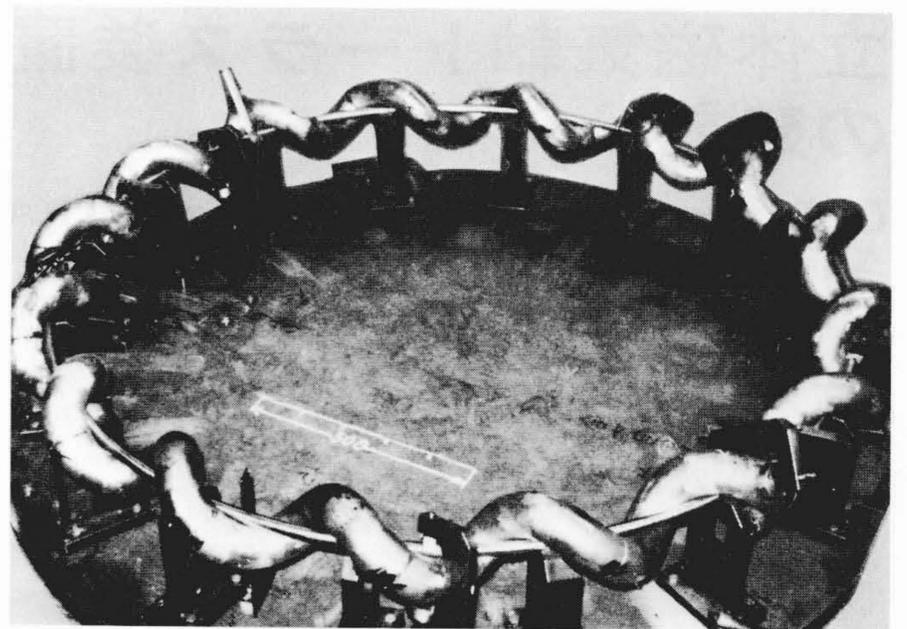


図3 真空容器 製作中の真空容器を示す。平均大半径に沿って置かれているリングは、製作時の基準となる治工具である。

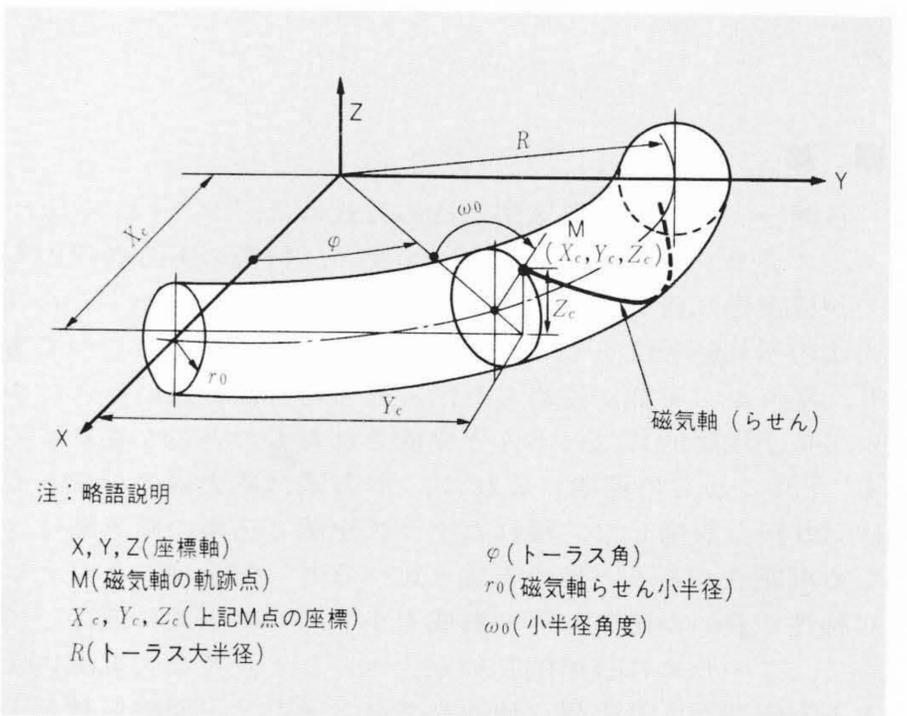


図4 磁気軸座標説明図 磁気軸を表示する基本式の座標説明を示す。

真空容器の中心軸は、磁気軸と一致するように定められた。トーラス角 φ での磁気軸の軌跡M点の座標(X_c, Y_c, Z_c)は、次式のように表示される(図4)。

$$X_c = (R - r_0 \cos \omega_0) \cos \varphi \dots\dots\dots(1)$$

$$Y_c = (R - r_0 \cos \omega_0) \sin \varphi \dots\dots\dots(2)$$

$$Z_c = r_0 \sin \omega_0 \dots\dots\dots(3)$$

$$\omega_0 = N\varphi \dots\dots\dots(4)$$

ここで R ：トーラス大半径(“NP-3”では800mm)
 r_0 ：磁気軸らせん小半径(“NP-3”では50mm)
 ω_0 ：小半径角度
 N ：周期数(“NP-3”では16)

この磁気軸を中心として、これに直交する法平面上に真空容器の断面半径 ρ (mm)の円を描けば、その円周が真空容器外周である。このように複雑な形状の真空容器を高精度で製作する方法として各種のものが比較検討されたが、採用された製作プロセスを図5に示す。すなわち、45度エルボをある角度でひねりながら接続面を溶接し、一体化していく方法を基本とするものである。しかし、理論解析の結果、エルボのひねりだけでは理想形状らせん磁気軸とエルボ接続面中心との寸法のずれは、最高で約16mmにも達することが明らかにな

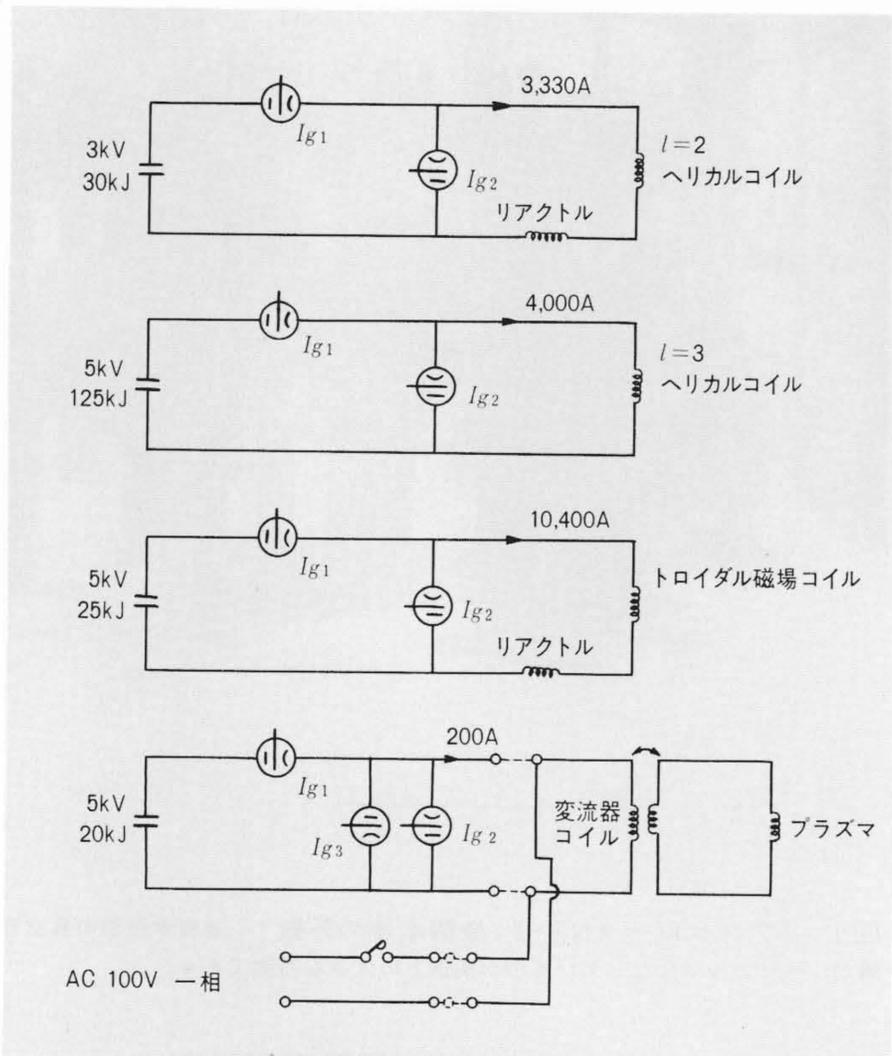


図2 コンデンサ電源 コンデンサ励磁電源のスケルトンを示す。

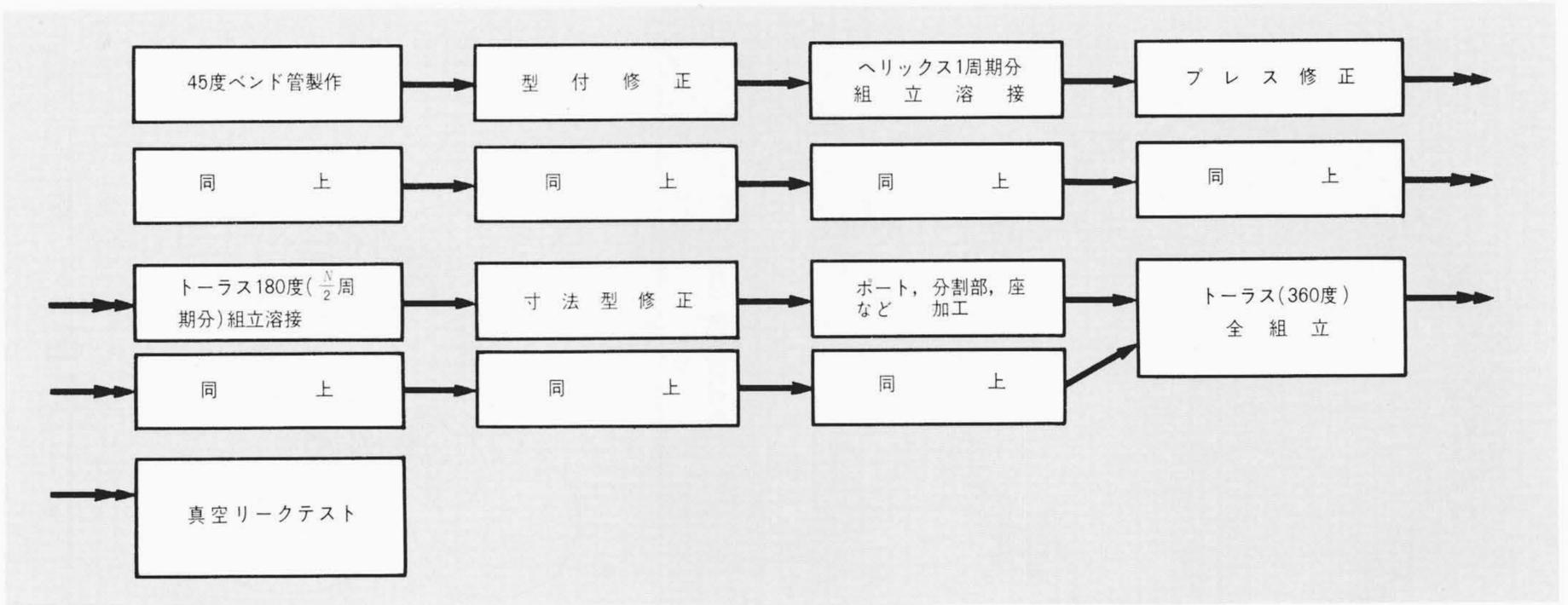


図5 真空容器の製造プロセス エルボ(45度ベンド管)を用いた真空容器製造プロセスの流れを示す。

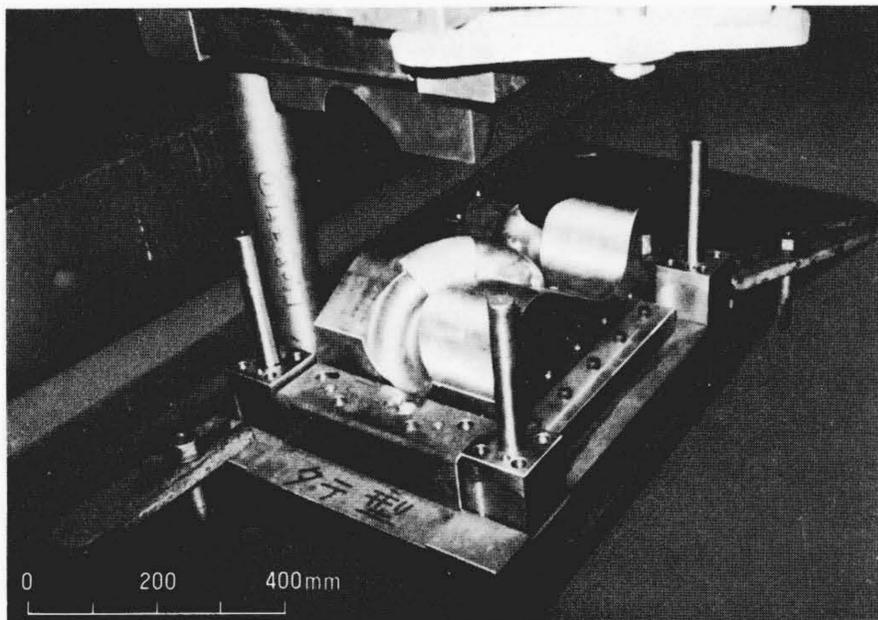


図6 真空容器の精密プレス用型 真空容器の寸法修正を行なう精密プレス型であり、ヘリックス1ピッチ分をプレス可能である。

った。そこで、真空容器の寸法誤差を±2mm以内にするために、別に図6に示すような1ピッチ分の精密プレス用型をNC(数値制御)加工機により製作し、エルボ接続で作った粗部分真空容器の寸法をプレスで修正する方法を採用して、公差内の高精度のものを完成することができた。

4 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは、真空容器の周りに等ピッチで192個配置されている。十分に巻かれていると仮定できるので、その磁気軸上の磁場 B_0 は次式で与えられる。

$$B_0 = \frac{2AT}{R_0 \sqrt{1 + N^2 \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2}} \times 10^{-7} \text{ (T)} \dots\dots\dots(5)$$

- ここで AT: 起磁力(AT)
- R_0 : 主半径(m)
- N: 周期数
- r_0 : 磁気軸らせん小半径(m)

一般のトラスでのトロイダル磁界は、トラス軸からの距離 R に半比例するが、アスペレータではそうはならない。すなわち、ヘリックスの軸から r の点のトロイダル磁場は、

次式で与えられる。

$$B(r) = B_0 \left\{ \frac{r_0^2 + (R_0/N)^2}{r^2 + (R_0/N)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(6)$$

図7に、トロイダル磁場コイルとその外側に巻回されたヘリカルコイル断面を示す。

5 ヘリカルコイル

ヘリカルコイルは図7に示すように、トロイダル磁場コイルの外側に巻回され、その対数は $l=2$ と $l=3$ の2種類のコイルとなっている。らせん状の真空容器の周りに巻くヘリカルコイルのためその配置は複雑で、図8にコイル中心の軌跡を示す。このような複雑な形状のコイルの磁場、電磁力及びインダクタンスの計算は簡単ではないが、コイルを電流の流れに沿った多数の直線要素に分割し、各要素ごとの磁気諸量の総和を求めることにより算定できる。例えば、図9に示すよ

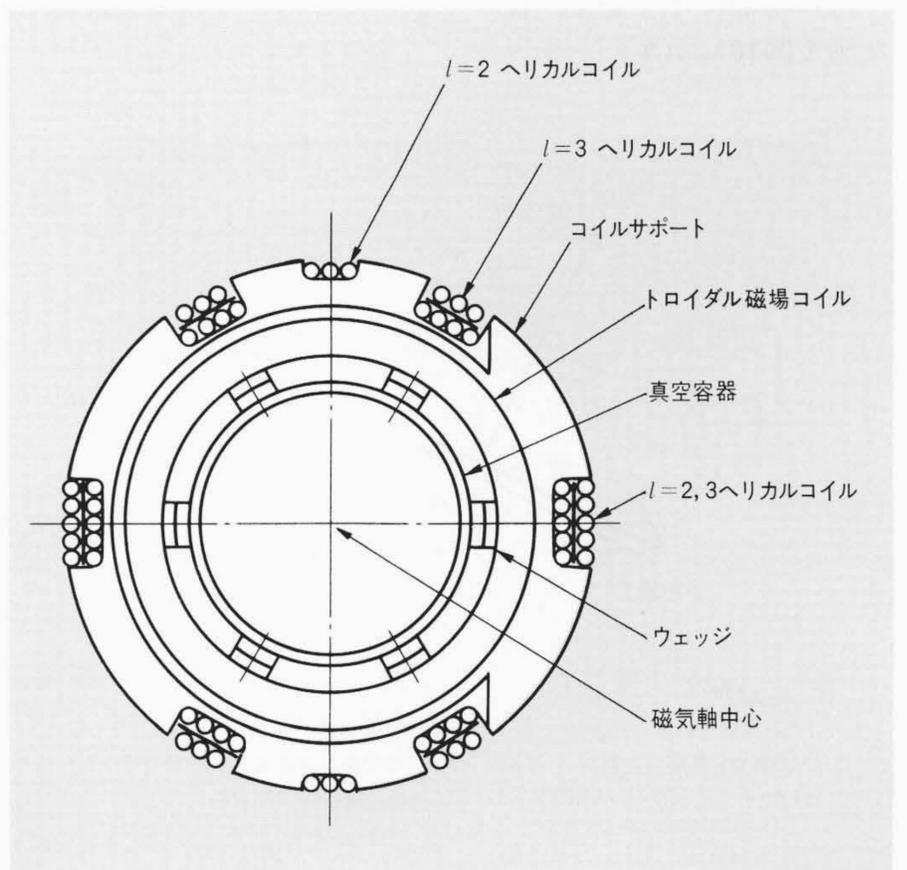


図7 ポロイダル断面 トロイダル磁場コイルとその外側に巻かれたヘリカルコイルの断面を示す。

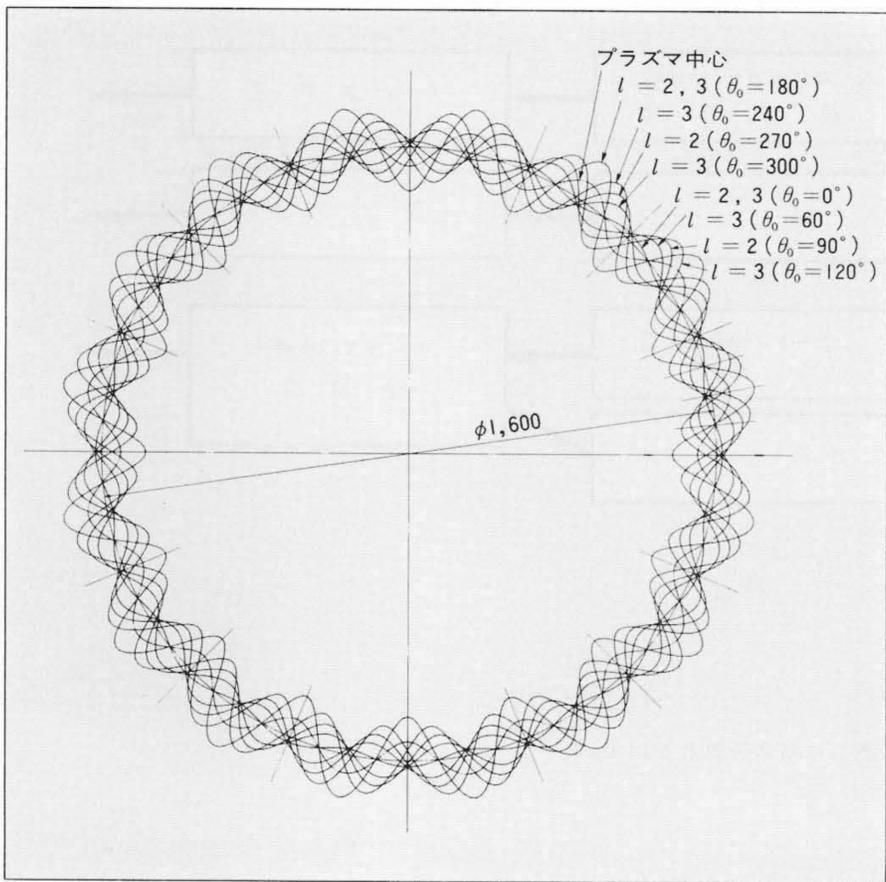


図8 ヘリカルコイル中心の軌跡 「アスペレータNP-3」のヘリカルコイル中心の軌跡を、コンピュータにより描いたものである。

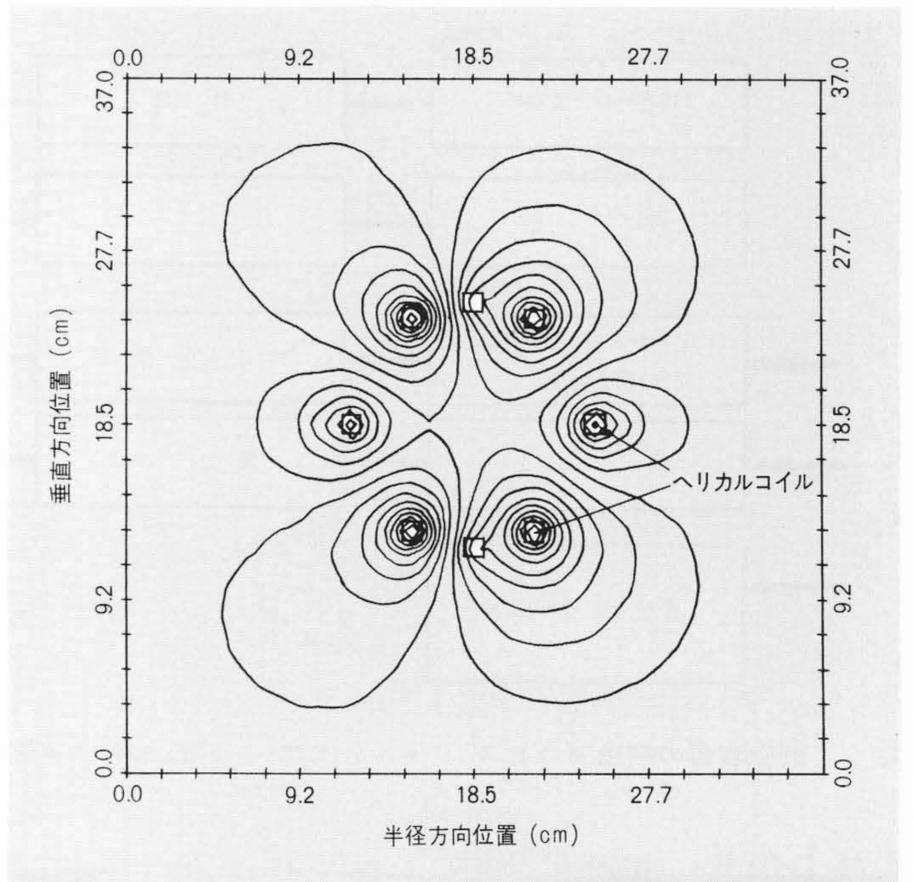


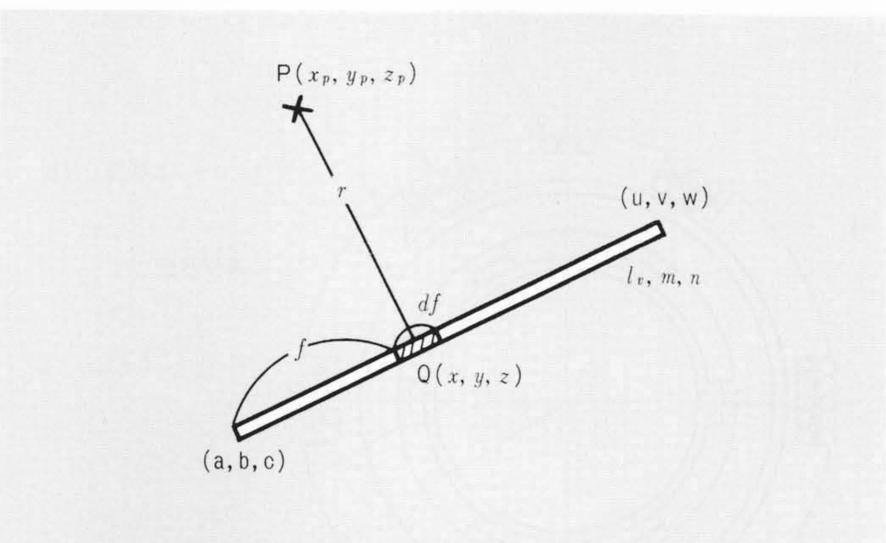
図10 ヘリカルコイルによる磁界計算例 「アスペレータNP-3」のヘリカルコイル(l=2+3)によるポロイダル断面での磁界(磁力線)のマッピング例を示す。

うな点(a, b, c)と点(u, v, w)とを結んで成る直線電流Iが、任意点P(x_p, y_p, z_p)に作る磁場Bは次式で求まる。

$$\dot{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^L \frac{1}{r^3} \left[\begin{aligned} & i(mz_p - ny_p - mc + nb) \\ & + j(nxp - lvz_p - na + lvc) \\ & + k(lvy_p - mx_p - lvb + ma) \end{aligned} \right] df \dots\dots\dots (7)$$

$$r^3 = [(x_p - lvf - a)^2 + (y_p - mf - b)^2 + (z_p - nf - c)^2]^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、Lは線分長、直線方向余弦をl_v, m, n, i, j, kはそれぞれx, y, z軸方向の単位ベクトルを表わす。(7)式は解析的に積分することができ、線分に関する入力としては始点と終点の座標だけでよく、使いやすい。このようにして計算した例を図10に示す。



注：略語説明
 P(磁界計算点) Q(電流微分長dfを考える点)
 r(Q点とP点間の距離) df(fの微分, すなわち電流微分長)
 f[点(a, b, c)とQ点の距離] l_v, m, n(直線方向余弦)

図9 直線電流による磁界 点(a, b, c)と点(u, v, w)を結ぶ有限長直線電流と、これによる磁界計算点P(x_p, y_p, z_p)の関係を示す。

6 結 言

立体磁気軸トーラス装置「アスペレータNP-3」は予定どおり建設が完了し、現在も順調に稼動している。東北大学により既に多くの成果が得られ発表されており、この方面の研究者の注目するところとなっている^{4),5)}。この装置は、機能と構造が従来の核融合装置にはない特徴をもち、技術的にも未経験の分野が多かったが、日立製作所と東北大学工学部は「NP-3」の設計製作の過程で遭遇した種々の問題を一つ一つ解決し、今後建設する規模の大きい同種装置にも自信をもって対応できる技術を確立することができた。この貴重な経験を将来に生かしてゆきたいと念願している。

終わりに、本装置の設計製作に当たり、御指導と御協力をいただいた関係各位に対し、厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 長尾：立体磁気軸トーラス，核融合研究，38/別冊その2，33 (1976)
- 2) S. Nagao, et al. : Magnet and Coil Engineering of Toroidal Device with a Non-planar Magnetic Axis, Proc. 7 th Symp. Eng. prob. Fusion Research I 84, (Knoxville, 1977)
- 3) J. Nührenberg : Equilibrium and Stability of 3 D MHD Equilibria without Ohmic Heating Current, Int. Symp. on Stellarators with Three Dimensional Magnetic Axis (Sendai, Aug. 1979), A-1
- 4) S. Nagao, et al. : Preliminary Experiments on the High Pressure Plasma in a Helical Pinch (Asperator NP-3), NETU-33 (Jan. 1979)
- 5) Y. Funato, N. Sasaki et al. : Asperator NP-3 Experiment - I, II, Int. Symp. on Stellarator - with Three Dimensional Magnetic Axis (Sendai, Aug. 1979), B-7, B-8