

JAERI-M

8204

IEA-LCT用超電導磁石のヘリウム
容器に生じる渦電流損失解析

1979年4月

細田義門*・島本 進

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

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

IEA-LCT用超電導磁石のヘリウム容器に生じる渦電流損失解析

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

細田 義門*・島本 進

(1979年3月20日受理)

IEA-LCT用超電導磁石のヘリウム容器に生じる渦電流損失を、有限要素法を用いた数値解析コード FEM3D 及び電磁方程式の2つの方法で解析した。両解析法共、誤差要因を含むが、解析結果は、17.7 watt 及び12.2 watt となった。従って、order 的には、10～20 watt と見積ることが出来る。

損失低減の方法としては、容器壁突合せ部に絶縁層を設ける方法を推奨する。

*) 外来研究員：住友電気工業株式会社

Eddy Current Loss Analysis for the Helium Vessel of the IEA-LCT Coil

Yoshikado HOSODA* and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 20, 1979)

The eddy current loss in the He vessel of the IEA-LCT coil was analyzed by finite element method, i.e. code FEM3D, and by electromagnetic equations. The result by FEM3D is 17.7 watts. and by electromagnetic equations 12.2 watts.

Both analyses including some approximations, the eddy current loss in He vessel is 10~20 watts.

To reduce the loss, it is recommended to insert an insulation layer in the corner part of the vessel.

Keywords; Superconductor, Toroidal Coil, Eddy Current Loss, Large Coil Task, Helium Vessel

* On leave from Sumitomo Electric Industries, Ltd.

目 次

1. ま え が き	1
2. 計算コード‘FEM3D’による計算結果	1
2.1 計算モデル	1
2.2 計算結果	2
3. 電磁方程式による解析	11
3.1 ステンレス鋼容器壁厚さ及び巾方向の磁束結合による渦電流 (i_1, i_2) について	11
3.2 ステンレス鋼容器を‘ロ’字形に循環する渦電流 (i_3) について	13
4. む す び	16
謝 辞	16
参 考 文 献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis with FEM3D	1
2.1 Model for analysis	1
2.2 Results	2
3. Analysis with electro-magnetic equations	11
3.1 Eddy currents by the flux coupling in the thickness and width direction of the stainless steel wall	11
3.2 Eddy current circled in '□' shape in the He can	13
4. Conclusion	16
Acknowledgement	16
References	16

1. ま え が き

IEA-Lorge Coil Task においては、超電導磁石に交流磁界が印加される。交流磁界により、超電導々体中に交流損失が発生し、厚肉のステンレス鋼よりなるヘリウム容器には、渦電流損失が生じる。これらの損失は、超電導磁石の安定性に対しては熱擾乱となり、ヘリウムの冷却に対しては熱負荷となる。

本報告書では、このうちヘリウム容器に発生する渦電流損失について、有限要素法による数値解析コード‘FEM3D’による計算結果及びそれに対する電磁方程式による考察について述べる。

2. 計算コード‘FEM3D’による計算結果

2.1 計算モデル

計算コード‘FEM3D’は、電磁方程式(2.1)、(2.2)を基に、有限要素法により、解を求めるものである。

$$\nabla \times \nabla \times \bar{A} + i\omega \sigma \mu (\bar{A} + \nabla \varphi) = \mu \mathbf{j}^{(e)} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{A} + \nabla^2 \varphi = 0 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

但し： $\varphi = \phi / i\omega$

\bar{A} ；ベクトル・ポテンシャル

φ ；スカラー・ポテンシャル

$\mathbf{j}^{(e)}$ ；外部電流密度

σ ；導電率

μ ；透磁率

他方、本報告書での計算の対象となる、LCT用超電導磁石については、既に種々の検討が行われており、^{(1), (2)}He 容器の寸法は、それらの検討結果の1つである引用文献(1)によるものとした。容器断面は Fig. 2.1 に示した様に、厚さ 7.5 mm のステンレス鋼が外形寸法 750 mm × 598 mm の矩形をなしている。

次に計算モデルについて説明する。計算コード‘FEM3D’は、セクター（扇）形状を取扱うのに便利に作られたコードである為、交流磁界を発生するパルス・コイル及び、計算対象のコイル形状を次に述べるモデルで取扱った。Fig. 2.2 (a) は、もともとのパルス・コイルと計算対象のコイルの相対位置と形状を説明する図であり、パルス・コイルは計算対象のコイルの Bore 中に収められている。Fig. 2.2 (b) はこれを‘FEM3D’に適用する為にモデル

1. ま え が き

IEA-Lorge Coil Task においては、超電導磁石に交流磁界が印加される。交流磁界により、超電導々体中に交流損失が発生し、厚肉のステンレス鋼よりなるヘリウム容器には、渦電流損失が生じる。これらの損失は、超電導磁石の安定性に対しては熱擾乱となり、ヘリウムの冷却に対しては熱負荷となる。

本報告書では、このうちヘリウム容器に発生する渦電流損失について、有限要素法による数値解析コード 'FEM3D' による計算結果及びそれに対する電磁方程式による考察について述べる。

2. 計算コード 'FEM3D' による計算結果

2.1 計算モデル

計算コード 'FEM3D' は、電磁方程式 (2.1)、(2.2) を基に、有限要素法により、解を求めるものである。

$$\nabla \times \nabla \times \bar{A} + iw \sigma \mu (A + V \varphi) = \mu j^{(e)} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{A} + V^2 \varphi = 0 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

但し； $\varphi = \phi / iw$

\bar{A} ；ベクトル・ポテンシャル

ϕ ；スカラー・ポテンシャル

$j^{(e)}$ ；外部電流密度

σ ；導電率

μ ；透磁率

他方、本報告書での計算の対象となる、LCT用超電導磁石については、既に種々の検討が行われており、^{(1), (2)}He 容器の寸法は、それらの検討結果の1つである引用文献(1)によるものとした。容器断面は Fig. 2.1 に示した様に、厚さ 75 mm のステンレス鋼が外形寸法 750 mm × 598 mm の矩形をなしている。

次に計算モデルについて説明する。計算コード 'FEM3D' は、セクター（扇）形状を取扱うのに便利なように作られたコードである為、交流磁界を発生するパルス・コイル及び、計算対象のコイル形状を次に述べるモデルで取扱った。Fig. 2.2 (a) は、もともとのパルス・コイルと計算対象のコイルの相対位置と形状を説明する図であり、パルス・コイルは計算対象のコイルの Bore 中に収められている。Fig. 2.2 (b) はこれを 'FEM3D' に適用する為にモデル

化されたコイルの相対位置と形状を説明する図であり、パルス・コイルは大半径に沿った2本の導体となり、計算対象のコイルはセクター形状となっている。(Fig. 2.2のA-A断面とB-B断面は同一形状)

Fig. 2.2(a)とFig. 2.2(b)のパルス・コイル配置の違いによるパルス磁界分布の差を調べた結果が、Fig. 2.3(a)と(b)であり、Fig. 2.3(a)はHe容器に垂直な成分、(b)は平行成分に関する図である。他にFig. 2.2(b)のタイプで、導体の本数や位置を変えて比較したが、Fig. 2.3の比較が最も差の少ないものであった。従ってFig. 2.2(b)に示したコイル配置で計算を行なうことにした。

境界条件に関しては、理想的には、無限遠点で $A=0$ となるが、無限平面を取扱うことは不可能であるので近似的に $A=0$ となる境界を磁場分布を参考にして設定した。Fig. 2.4はR-方向、Z-方向の磁場分布を示す図である。磁場の大きさ、寸法のバランスを考え、 $R=0$ 側へ4M、 $R=\infty$ 側へ2.5Mのラインを、Z-方向には $Z=\infty$ 側へ2.5Mのラインを $A=0$ の境界とした。Fig. 2.5は、この境界内でのR-Z平面における要素分割図であり、Fig. 2.6は、O-方向の分割図である。セクター形状を出来るだけ矩形に近くする為 $R=0$ 点から、コイル中心迄の距離は大きくとり、15,786mmとした。

パルス・コイルに流れる電流は、Fig. 2.7(a)に示す波形であるが、それをFig. 2.7(b)に示す形で、フーリエ展開した。各調波の周波数及び電流密度をFig. 2.7(c)に示した。電流密度は、Fig. 2.3のB(inner)のピーク値が、0.14Tとなるようにして定めたものである。

2.2 計算結果

渦電流損の計算に際しては、ステンレス鋼の導電率を4.2Kで、 $2 \times 10^6 \text{ } \Omega/\text{m}$ とした。⁽³⁾各フーリエ成分についての渦電流損失をTable 2.1に示した。第18調波迄は各調波に関する値であり、19~26調波迄の6調波の小計については、第19調波の渦電流損の6倍で近似した。同様にそれ以上の高調波成分については、考えている範囲で、最も損失が大きいと思われる調波についての解を、調波数分だけ倍することにより、近似の小計を求めた。上記の方法で求めた結果、300調波迄の累計は17.7 watt となった。各調波に関する累計の様相はFig. 2.8に示した通りである。300調波迄の累計は十分に飽和していると考えてよく、近似的には20調波迄の累計で充分であると考えられる。

次に渦電流密度の分布を調べた結果をFig. 2.9(a)~(e)に示した。Fig. 2.9(a)は第1調波、(b)は第2調波、(c)は第3調波、(d)は第7調波、(e)は第11調波をに関する電流密度の分布を示したものである。いずれの場合も、直線形状部、I、IIで大きな渦電流密度となった。この大きな電流密度を示す渦電流のモードを探る為に、直線形状部の各要素で最も大きな電流成分をもつ電流の方向と密度の大略値をFig. 2.10に示した。直線形状部はFig. 2.3(b)に示した様にパルス磁界の平行成分が最も大きい部分であることを考え合せるとFig. 2.10のモードは、ステンレス鋼ヘリウム容器のロ字形断面を循環するモードであると推定出来る。

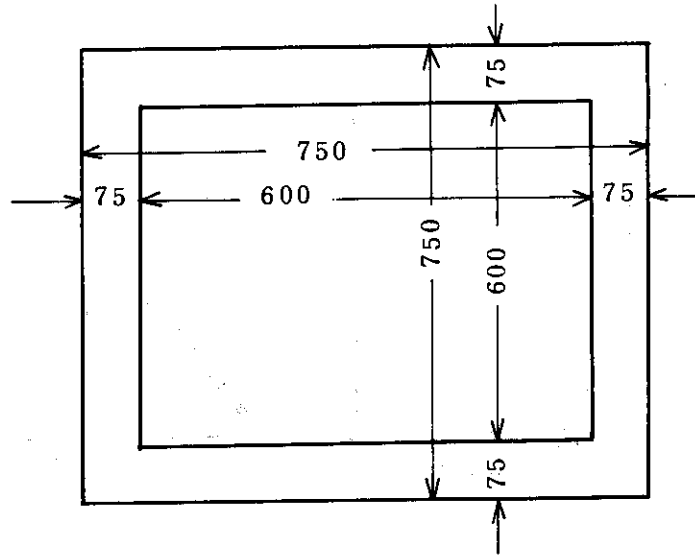
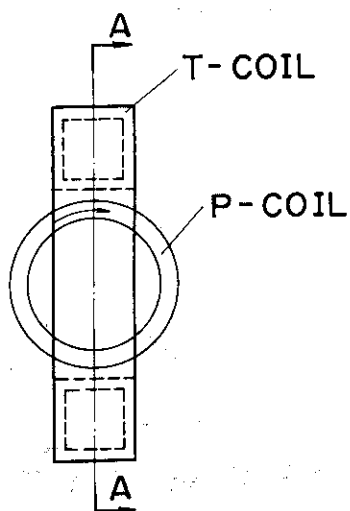
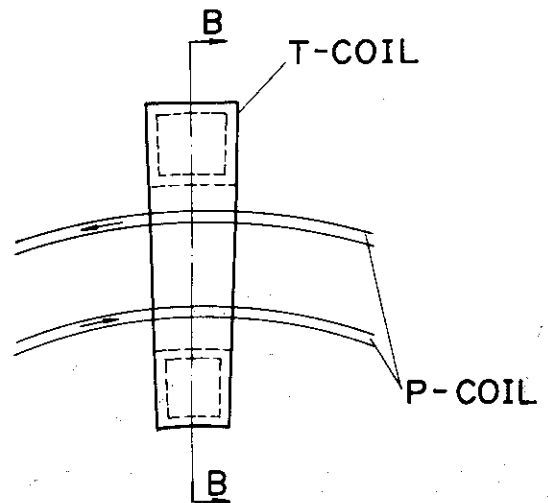


Fig. 2.1 Sectional view of He vessel



(a) Coil arrangement in LCT



(b) Model in Analysis

Fig. 2.2 Comparison of Coil arrangement
(the B-B cross section is the same as the A-A cross section)

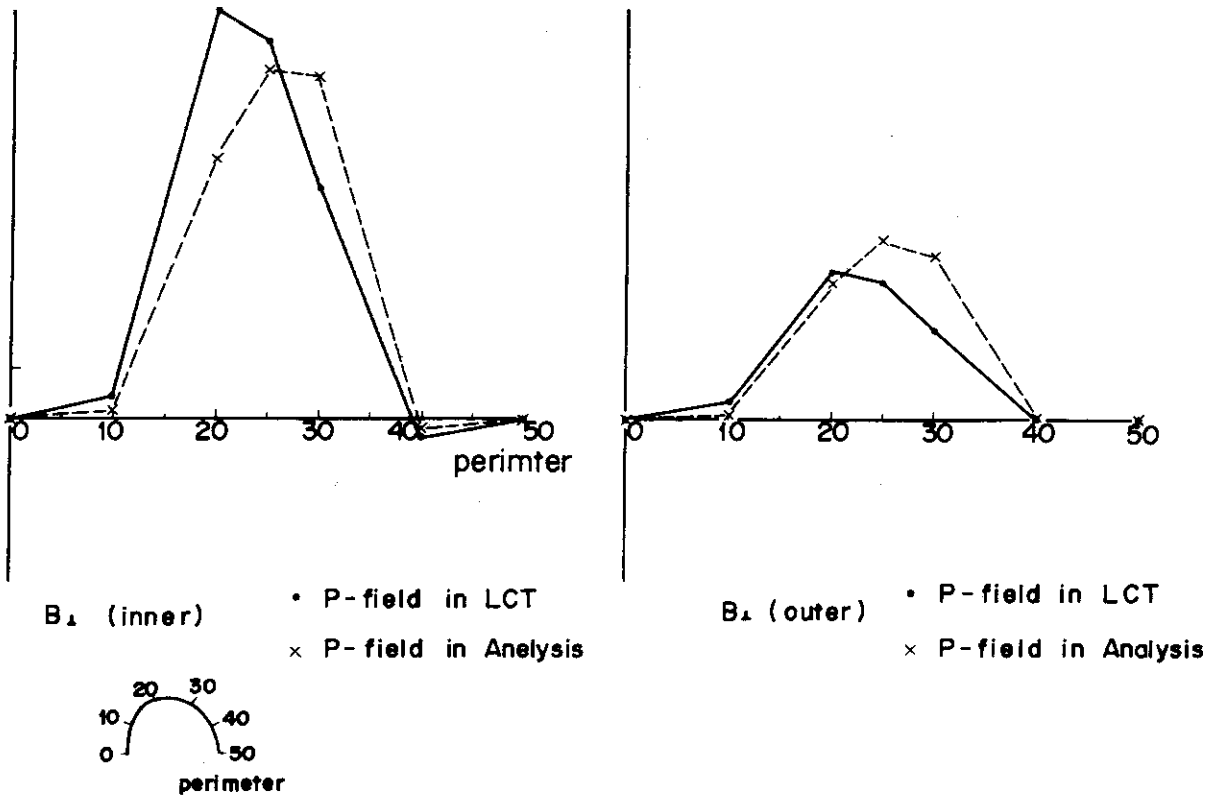


Fig. 2. 3(a) Comparison of P-field distribution

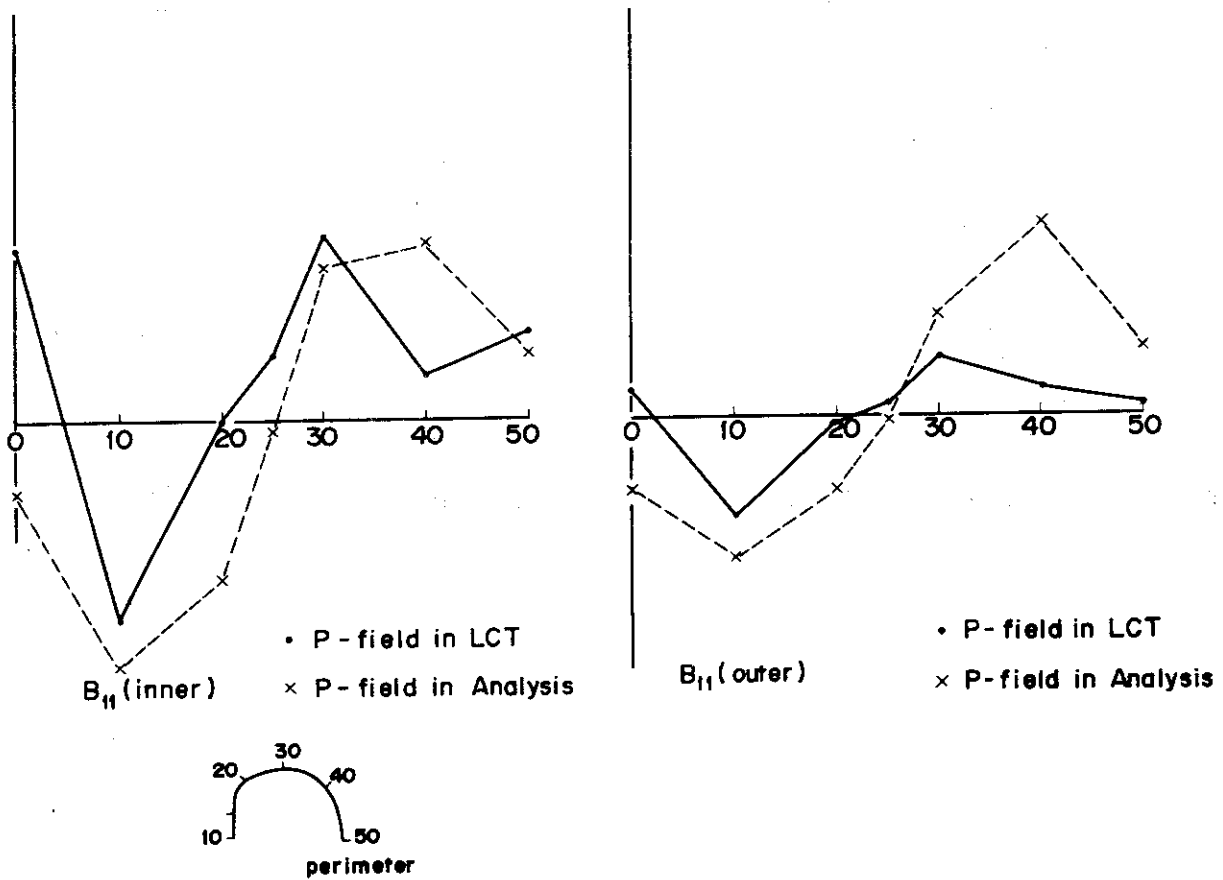


Fig. 2. 3(b) Comparison of P-field distribution

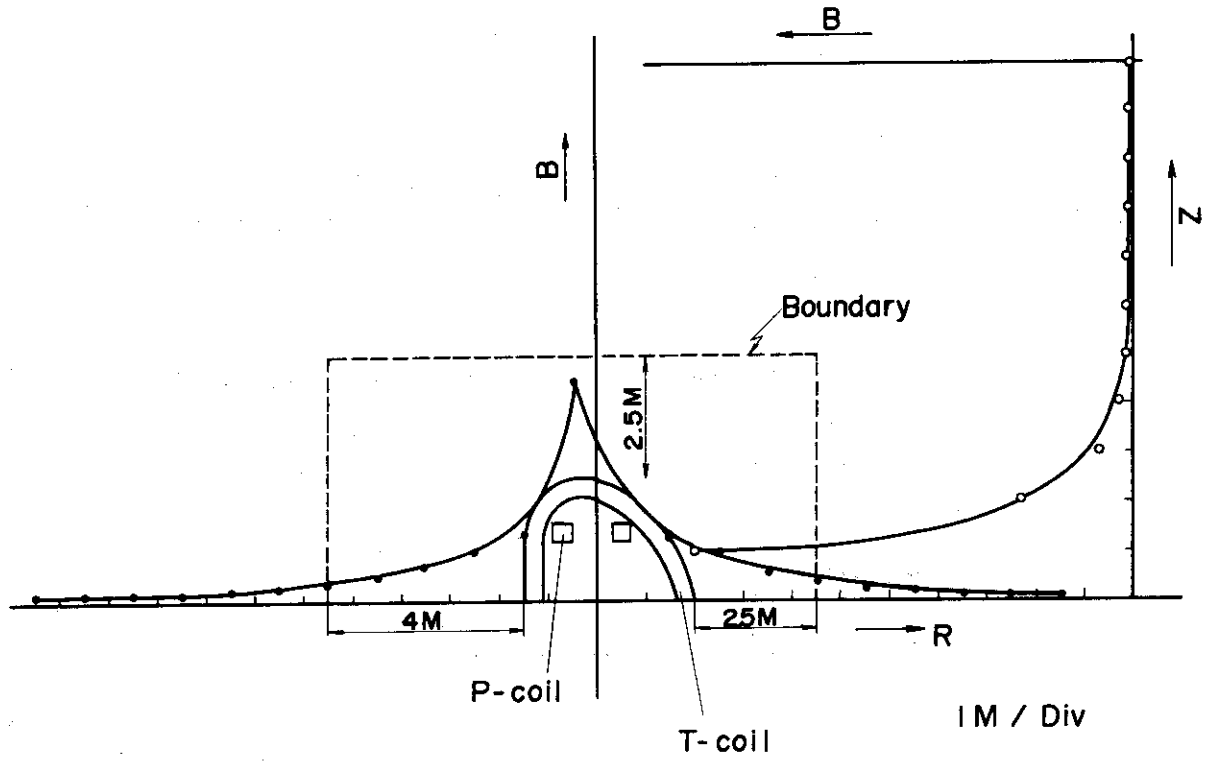


Fig. 2.4 Decision of the boundary

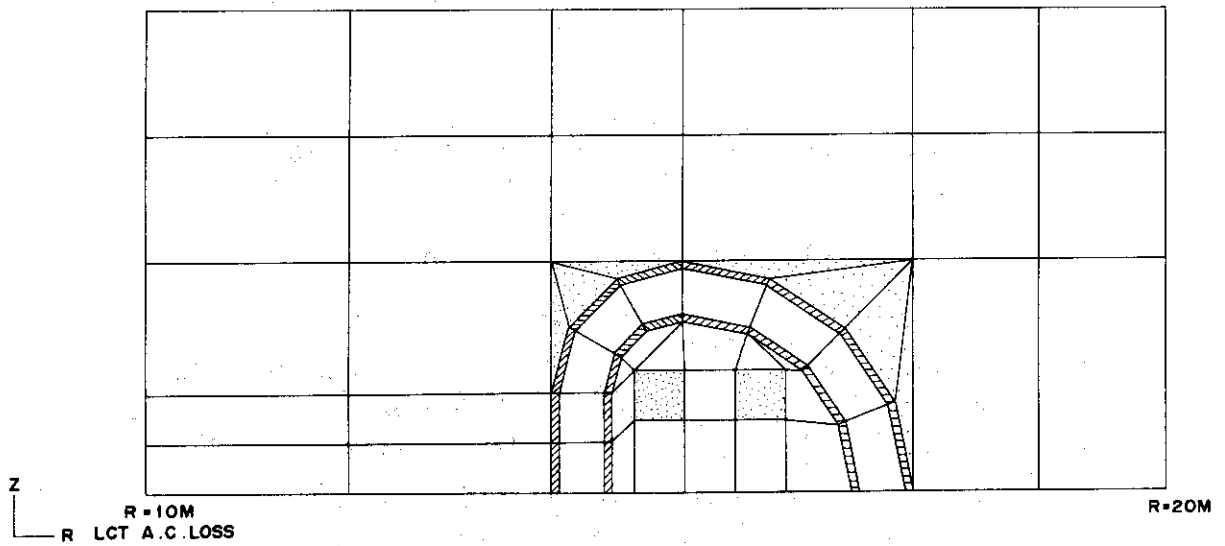
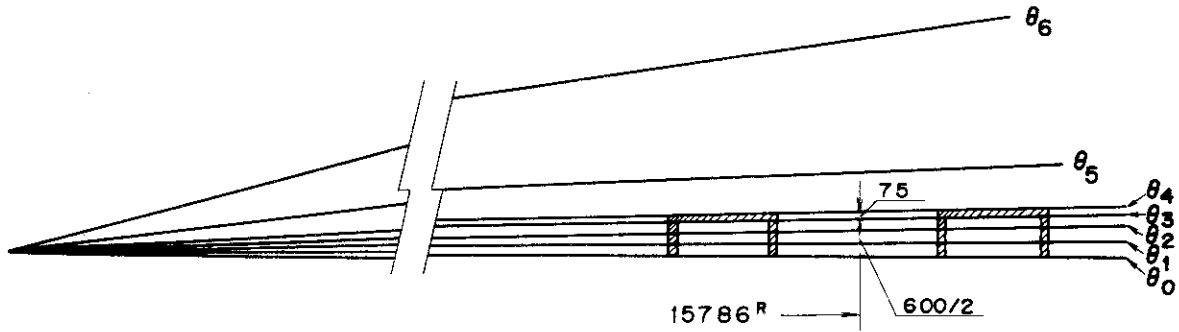
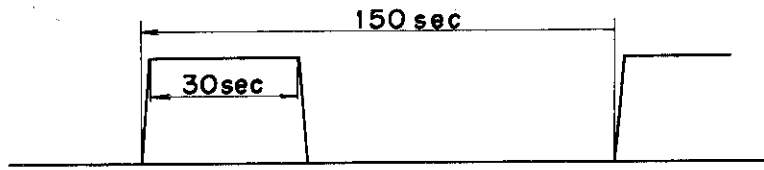


Fig. 2.5 Element map in R-Z plane

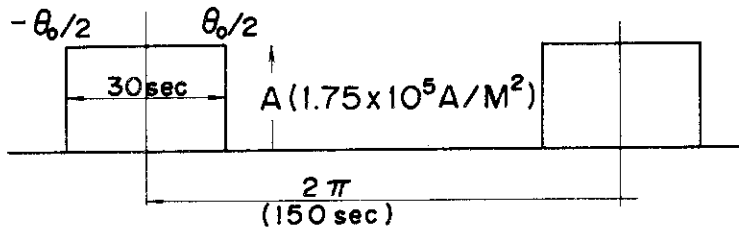


$$\theta_0 = 0, \theta_1 = 0.36^\circ, \theta_2 = 0.72^\circ, \theta_3 = 1.08^\circ, \theta_4 = 1.35^\circ, \theta_5 = 10^\circ, \theta_6 = 30^\circ$$

Fig. 2.6 Node Division in θ -direction



(a) P - curr



$$f(\theta) = \frac{A\theta_0}{2} \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\theta_0/2)}{(n\theta_0/2)} \cos n\theta \right]$$

(b) Fourier's expansion

n	f _n	i _n	n	f _n	i _n	n	f _n	i _n
1	6.7x10 ⁻³	6.55x10 ⁴	12	0.08	0.88x10 ⁴	57	0.38	-0.19x10 ⁴
2	0.013	5.3	13	0.087	0.81	77	0.51	-0.14
3	0.02	3.5	14	0.093	0.47	97	0.65	-0.11
4	0.027	1.6	16	0.106	-0.4	147	0.98	-0.07
6	0.04	-1.1	17	0.113	-0.62	197	1.31	-0.05
7	0.047	-1.5	18	0.12	-0.59	297	1.98	-0.035
8	0.053	-1.32	19	0.127	-0.34			
9	0.06	-0.73	27	0.18	-0.39			
11	0.073	0.6	37	0.25	-0.29			

f_n : Hz
i_n : A/m²

(c) Frequency and curr. density of n-th component

Fig. 2.7 Fourier expansion of paroidal Current

Table 2.1 Eddy curr. loss in SUS wall

n	W(watt)	n		W	n		W		
1	2.83	19	} W _{19x6}	0.2	77	} W _{77x16}	0.01		
2	3.00	{			{				
3	1.97	26			{			96	{
4	0.58								
6	0.55	27	} W _{27x8}	0.22	97	} W _{97x40}	0.01		
7	1.62	{			{				
8	1.92	36			{			146	{
9	1.03								
11	0.87	37	} W _{37x16}	0.18	147	} W _{147x40}	0.003		
12	1.33	{			{				
13	0.76	56			{			196	{
14	0.19								
16	0.08	57	} W _{57x16}	0.03	197	} W _{197x100}	0.003		
17	0.15	{			{				
19	0.12	76			{			296	{

$$\sum_{n=1}^{300} W_n \approx 17.7 \text{ Watt}$$

$$\sigma_{SUS} = 2 \times 10^6 \text{ U/m}$$

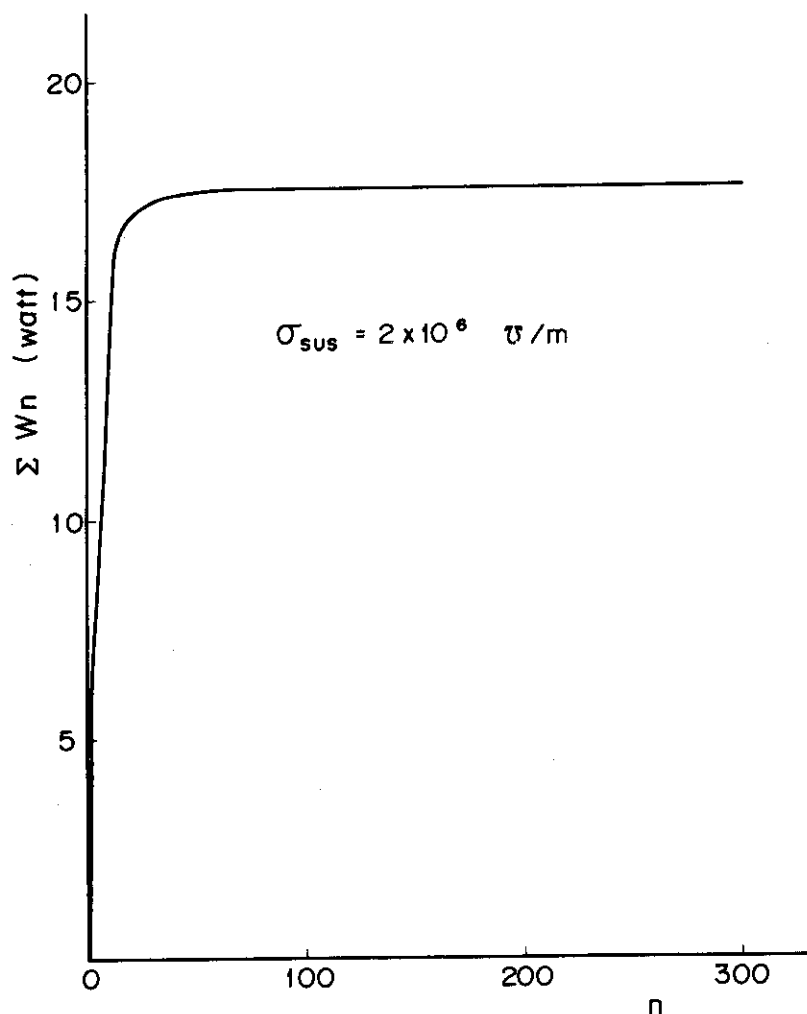
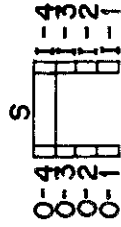
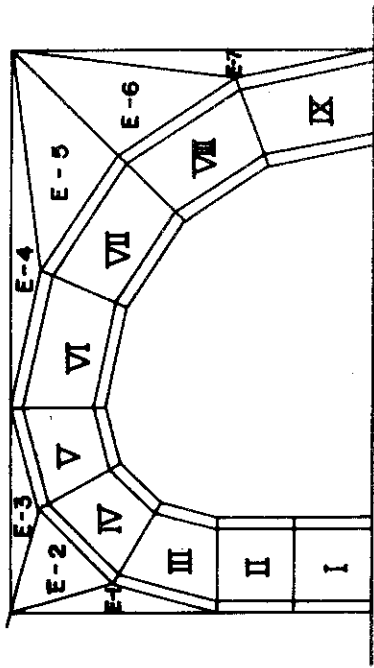


Fig 2.8 Profiles of ΣW_n

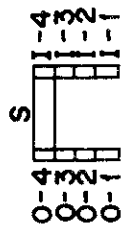
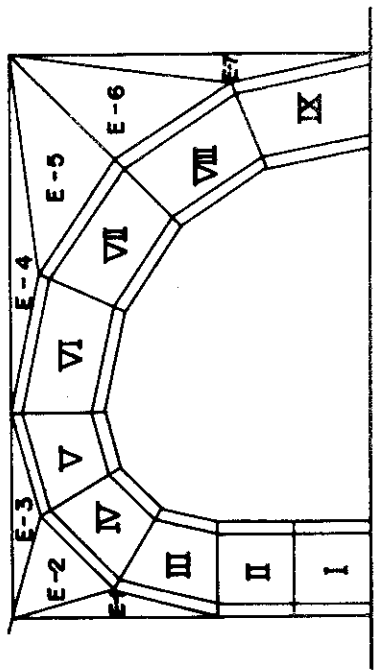


	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
O-1	○								○
O-2	○					○			
O-3	●								●
O-4	●	■	■	■	■	■	■	■	■
S	●	■	■	■	■	■	■	■	■
I-4	■	■	■	■	■	■	■	■	■
I-3	○	●	●	●	●	●	●	●	●
I-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
I-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○

E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- 0 ~ 2000 A/m²
- 2000 ~ 4000 A/m²
- 4000 ~ 6000 A/m²
- 6000 ~ 8000 A/m²
- ▨ 8000 ~ 10000 A/m²
- 10000 A/m² ~

Fig. 2. 9(a) Eddy curr. distribution by 1-st wave.

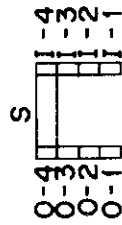
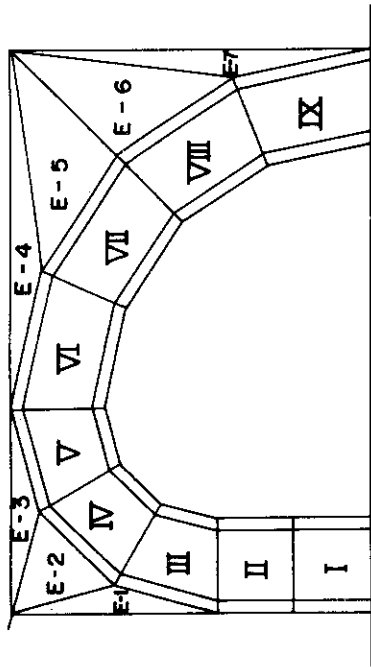


	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
O-1	●								○
O-2	●					○			
O-3	●	○							●
O-4	●	■	■	■	■	■	■	■	■
S	●	■	■	■	■	■	■	■	■
I-4	■	■	■	■	■	■	■	■	■
I-3	○	●	●	●	●	●	●	●	●
I-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
I-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○

E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- 0 ~ 2000 A/m²
- 2000 ~ 4000 A/m²
- 4000 ~ 6000 A/m²
- 6000 ~ 8000 A/m²
- ▨ 8000 ~ 10000 A/m²
- 10000 A/m² ~

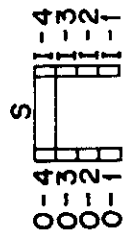
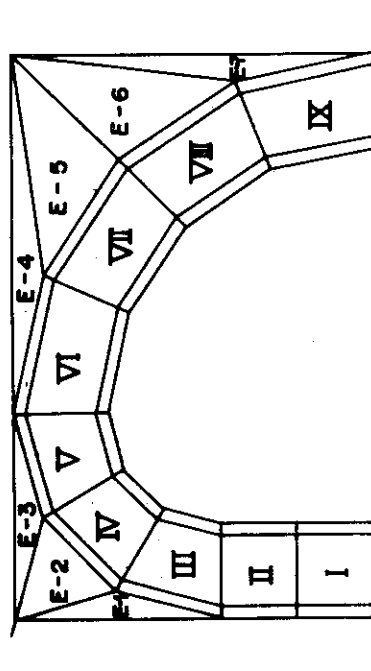
Fig. 2. 9(b) Eddy curr. distribution by 2-nd wave.



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
0-1	•	○							
0-2	•	○							
0-3	○	○							
0-4	▨	▨							
S	•	•							
I-4	•	▨				○			
I-3	•	○							
I-2	•	○							○
I-1	•								

E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- 0~2000 A/m²
- 2000 ~ 4000 A/m²
- 4000 ~ 6000 A/m²
- ▨ 6000 ~ 8000 A/m²
- ▩ 8000 ~ 10000 A/m²
- 10.000 A/m² ~



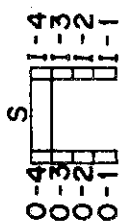
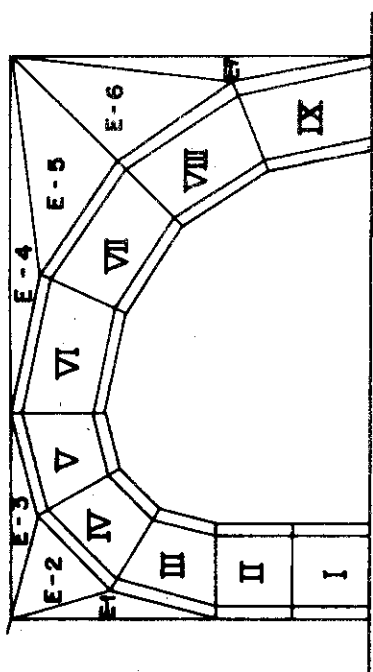
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
0-1	•								○
0-2	•								○
0-3	•	○							
0-4	▨	▨							
S	•	•							
I-4	•	▨							
I-3	○	○							
I-2	○	○				○			
I-1	○	○							

E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

- 0~2000 A/m²
- 2000~4000 A/m²
- 4000~6000 A/m²
- ▨ 6000~8000 A/m²
- ▩ 8000~10.000 A/m²
- 10000 A/m² ~

Fig. 2. 9(c) Eddy curr. distribution by 3-rd wave

Fig. 2. 9(d) Eddy curr. distribution by 7-th wave



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
0-1	○	○							
0-2	○	○							
0-3	○	○							
0-4	○	○							
S	●	○							
1-4	●	●				○			
1-3	●	○							
1-2	●	○							
1-1	●								



- 0 2000 A/m² ▨ 6.000 ~ 8000 A/m²
- 2000 ~ 4000 A/m² ▩ 8000 ~ 10.000 A/m²
- 4000 ~ 6000 A/m² ■ 10.000 A/m² ~

Fig. 2. 9(e) Eddy curr. distribution by 11-st wave

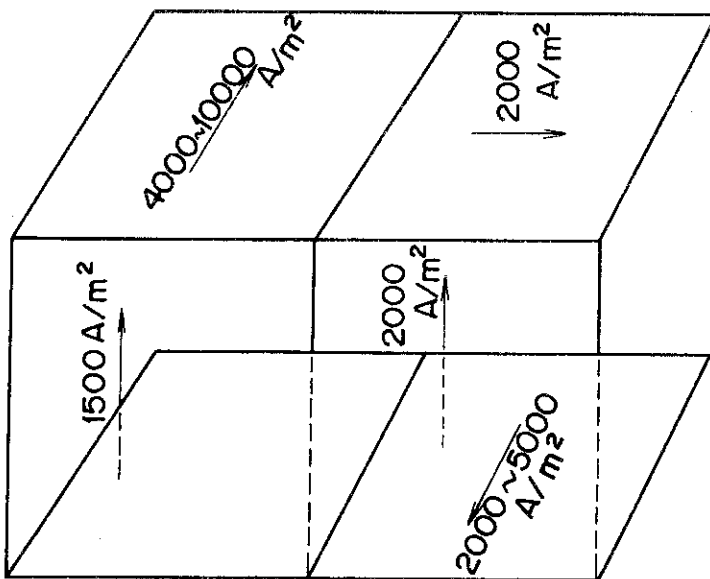


Fig. 2. 10 Eddy curr. mode in inner led.

3. 電磁方程式による解析

本章では、前章で述べた、有限要素法による解析結果の妥当性を、電磁方程式を解くことにより検討する。電磁気学的に考えられる渦電流のモードをFig. 3.1に示した。Fig. 3.1はHe容器の周方向の1部分に切り出して図示したものである。 i_1 は平行磁界(B_{11})とステンレス鋼ヘリウム容器壁の厚さ方向のカップリングにより生ずる渦電流であり、 i_2 は垂直磁界(B_{\perp})とステンレス鋼ヘリウム容器壁の巾方向のカップリングにより生ずる渦電流であり、 i_3 は、平行磁界(B_{11})と、ステンレス鋼ヘリウム容器壁が形成するロ字形断面とのカップリングにより生ずる渦電流である。以下、それぞれのモードについて、解析を行なう。

3.1 ステンレス鋼ヘリウム容器壁厚さ及び巾方向の磁束結合による渦電流 (i_1, i_2)について

ヘリウム容器に印加されるパルス磁界は、Fig. 3.2に示す様に1秒立上げ、30秒のflat-top、1秒立下げのパルスが150秒周期で繰返えされるパターンである。この程度の磁界の変化でステンレス鋼ヘリウム容器壁に大きな渦電流が生じるかどうかを、Fig. 3.2に示すような、巾 d に対して垂直に B が突印された場合の磁界の拡散モデルで検討する。磁界の拡散時定数は、(3.1)式で与えられ、⁽⁴⁾

$$\tau = \mu_0 \sigma d^2 / \pi^2 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ヘリウム容器の場合は、 $\sigma = 2 \times 10^6$ Ω^{-1}/m であるから、 $d = 0.075$ m (Fig. 3.1中 i_1 の場合に対応)の場合で、 $\tau = 1.4 \times 10^{-3}$ sec となり、 $d = 0.75$ m (Fig. 3.1中 i_2 の場合に対応)の場合で、 $\tau = 0.14$ secとなる。これらの値と磁界の立上り時間が1秒であることを考えると、 i_1 は極めて小さく、 i_2 を評価すればよい。

Fig. 3.4に、 i_2 の解析の為に1次元モデルを示した。導体は巾 $2b$ でX-方向に無限長あり、磁界はZ-方向に印加される。渦電流はX-方向の成分 J_x のみである。このモデルにMaxwellの方程式を適用すると、(3.2)及び(3.3)式が得られる。

$$\partial J_x / \partial y = \sigma \mu \partial H_z / \partial t \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\partial H_z / \partial y = J_x \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

但し、(3.2)式中 σ は

$$\sigma = \sigma_0 \cdot a \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

σ_0 ; 導体導電率

a ; 導体厚

で与えられる。(3.2)と(3.3)式より

$$\partial^2 H_z / \partial y^2 = \sigma \mu \partial H_z / \partial t \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

という形の拡散方程式が得られる。ここで磁界の時間関数を $e^{j\omega t}$ とすると(3.5)式は

$$d^2 H / dy^2 = \alpha^2 H \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\text{但し } \alpha = (1 + j) / \delta$$

$$\delta = \sqrt{2 / (\omega \sigma \mu)}$$

(3.6)式を $y = \pm b$ で $H = H_s$ の境界条件で解くと、

$$\left. \begin{aligned} H &= H_s \frac{\cosh(\alpha y)}{\cosh(\alpha b)} \\ J &= \alpha H_s \frac{\cosh(\alpha y)}{\cosh(\alpha b)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.7)$$

となり

i_2 による単位長当りの渦電流損 Pe は、

$$Pe_2 = \frac{1}{2\sigma} \int_{-b}^b |J|^2 dy$$

$$= \frac{H_s^2}{\sigma \delta} \frac{\sinh \gamma - \sin \gamma}{\cosh \gamma + \cos \gamma} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\text{但し } \gamma = 2b / \delta$$

となる。

LCT用ヘリウム容器の場合に、 $a = 0.075 \text{ m}$ 、 $b = 0.75 / 2 = 0.375 \text{ m}$ 、 $\sigma_0 = 2 \times 10^6 \text{ } \Omega / \text{m}$ 、 $H_s = 0.14 / \mu_0$ 、 $\omega = 2\pi \times (1/4)$ として(3.8)式に代入すると、 $Pe = 126 \text{ W/m}$ となった。これは0.25 Hzの磁界が連続して印加した場合の値に相当するので、実際のFig. 3.2に示した波形では近似的にこの値の2/150即ち1.68 W/mとなる。Fig. 2.3(a)の磁界分布から、0.14 Tの磁界は全周の約20%と考えてよく、全周は約1.1 mであるので、内外周合せて、約7.4 Wの渦電流損となる。

3.2 ステンレス鋼ヘリウム容器を‘口’字形に循環する渦電流 (i_s)について

このモードの渦電流の計算モデルをFig.3.5により説明する。容器で‘口’字型にとり囲まれた B_{11} とのカップリング面積を S とすると、起電力 e は(3.9)式で与えられる。

$$e = S \cdot \frac{d}{dt} B_{11} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

他方、 B_{11} の絶対値が大きく、実質的に大部分の渦電流が流れる容器の部分の周長を有効長 h として考えると、回路の抵抗分 R は

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot 2(a+b) / (h \cdot d) \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

a : 容器巾

b : 容器高

d : 容器壁厚

インダクタンス L は正方形のわくに巻かれた単層コイルの式⁽⁵⁾で正方形の1辺を $C = 1/2(a+b)$ と評価して、

$$L = 10^{-7} \{ 4\pi C^2 N^2 F / h \} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

但し、 N : 巻数

$$F = 1 - 0.473(C/h) + 0.1592(C/h)^2$$

で与えられる。 LCT の場合は、Fig.3.6に示す様にパルス磁界は1秒の立上りとなる為、起電力は、1秒の間けつパルスとなる。 R と L について具体的に数値計算を行なうと、 $h = 2$ m, $N = 1$ ターンとして、

$$R = 0.8 \times 10^{-5} \Omega, L = 1.9 \times 10^{-7} \text{ となり、}$$

時定数は0.023秒となるので、1秒間のパルス起電力に対しては、 L による時間遅れの影響は、無視してよい。従って、渦電流損は、

$$Pe_s = e^2 / R \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

で求まる。

$\dot{B}_{11} = 0.14 \text{ T/sec}$, $S = 0.27 \text{ m}^2$ であるので(3.12)より、 $Pe_s = 179 \text{ watt}$ となる。このパターンの損失はinner-leg部とouter-leg部で発生し、かつ、パルス磁界の立上り、立下り部で発生するので、150秒間では平均的に、この値の $4/150$ 即ち、4.8 wattの損失となる。

従って(3.8)式の結果と加算すると全体として122 wattの渦電流損となった。

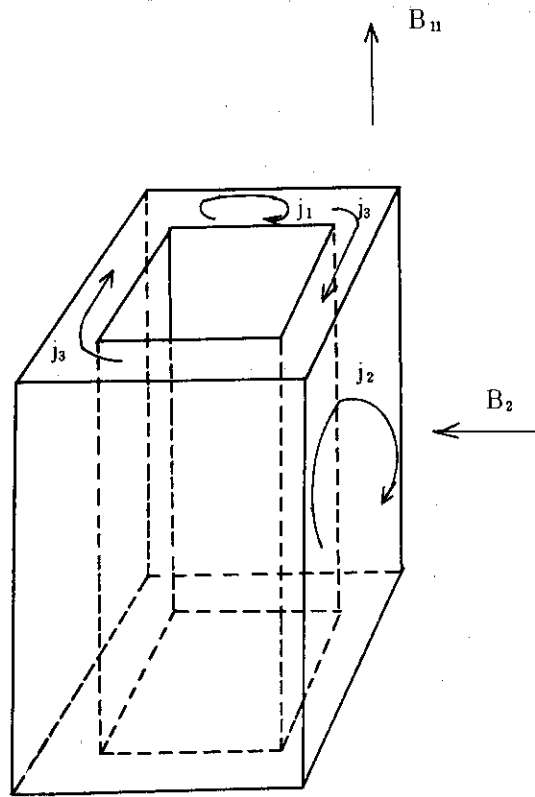


Fig. 3.1 Schema of eddy current

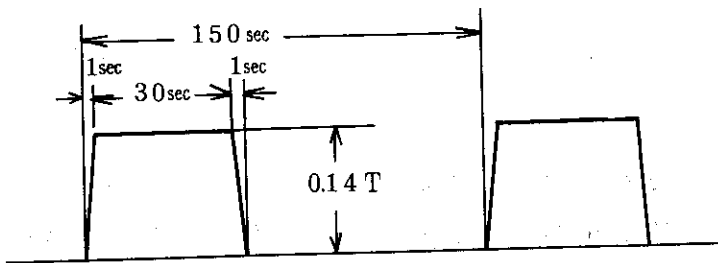


Fig. 3.2 Pulse field pattern

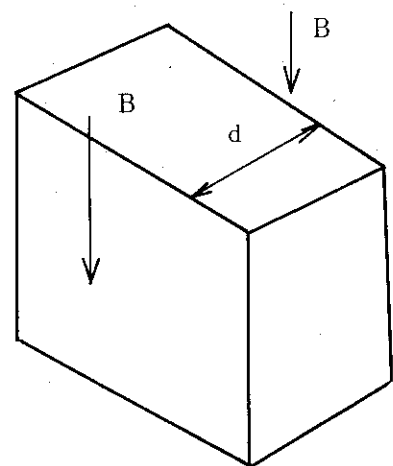


Fig. 3.3 Magnetic diffusion

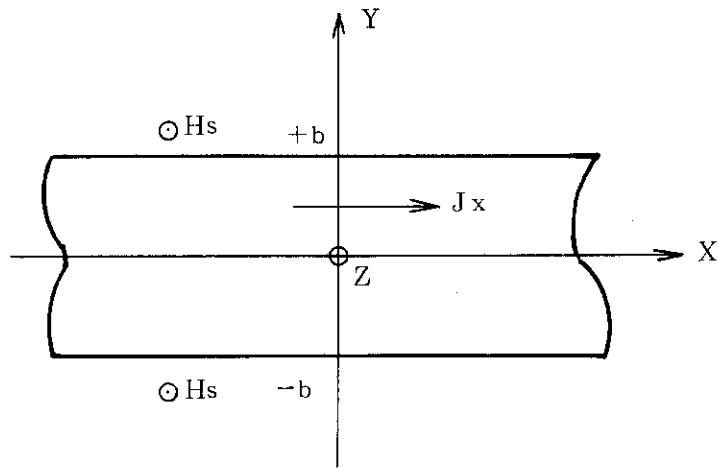


Fig. 3.4 One dimensional model of analysis

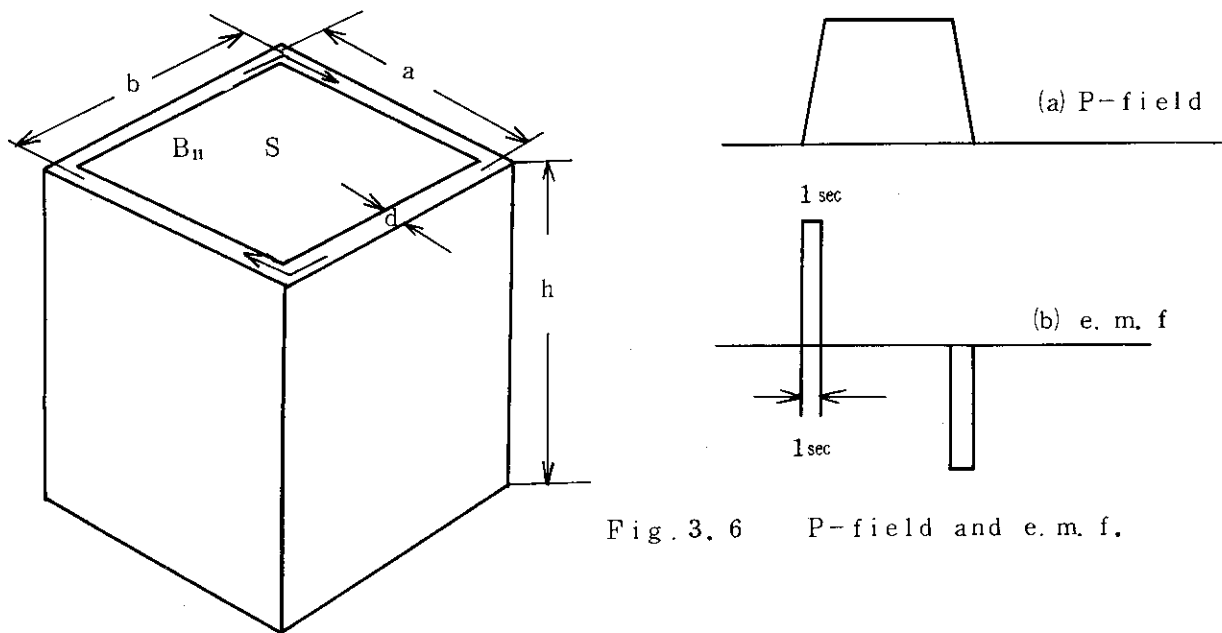


Fig. 3.6 P-field and e. m. f.

Fig. 3.5 Circular current model

4. む す び

ヘリウム容器に発生する渦電流損失の値は、解析コード‘FEM3D’で求めた場合が17.7 watt,電磁方程式で求めた場合が12.2 watt となった。‘FEM3D’では、有限要素の大きさや、計算領域の広さが誤差要因となり、電磁方程式では、1次元モデル化や、時間平均の方法、有効長の大きさが誤差要因となる。しかしながら、それぞれの解析手法の誤差要因は、互に独立していると考えられるので、上記の2つの値は、近似的には有効であると考えられる。従って、渦電流損失はほぼ10~20 watt と見積って良い。

損失の低減には、容器壁突合せ部に絶縁層を設けて、 i_3 のモードを消すことが、実施の容易さから考えても有効な方法である。

謝 辞

計算コード‘FEM3D’の提供を始め、種々の御好意を賜った、大型トカマク開発部、二宮博正研究員及び、都築直久外来研究員に感謝致します。

日頃、御指導および御鞭達していただいている森茂核融合研究開発推進センター長および小幡行雄核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 細田, 島本; ORNL-Large Coil Taskにおける熱的問題の検討 JAERI-M 7546, 1978年2月
- (2) 吉田, 安藤, 島本; ORNL-LCT の磁界と応力の解析 JAERI-M 7543, 1978年2月
- (3) N.B.S Handbook on Materials for Superconducting Machinery MCIC -HB-04 Jan. 1977
- (4) 例えば 大越, 二宮訳 電気力学 産業図書
- (5) 電気工学ハンドブック

4. む す び

ヘリウム容器に発生する渦電流損失の値は、解析コード‘FEM3D’で求めた場合が17.7 watt.電磁方程式で求めた場合が12.2 watt となった。‘FEM3D’では、有限要素の大きさや、計算領域の広さが誤差要因となり、電磁方程式では、1次元モデル化や、時間平均の方法、有効長の大きさが誤差要因となる。しかしながら、それぞれの解析手法の誤差要因は、互に独立していると考えられるので、上記の2つの値は、近似的には有効であると考えられる。従って、渦電流損はほぼ10~20 watt と見積って良い。

損失の低減には、容器壁突合せ部に絶縁層を設けて、 i_3 のモードを消すことが、実施の容易さから考えても有効な方法である。

謝 辞

計算コード‘FEM3D’の提供を始め、種々の御好意を賜った、大型トカマク開発部、二宮博正研究員及び、都築直久外来研究員に感謝致します。

日頃、御指導および御鞭達していただいている森茂核融合研究開発推進センター長および小幡行雄核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 細田，島本； ORNL-Large Coil Taskにおける熱的問題の検討 JAERI-M 7546, 1978年2月
- (2) 吉田，安藤，島本； ORNL-LCT の磁界と応力の解析 JAERI-M 7543, 1978年2月
- (3) N.B.S Handbook on Materials for Superconducting Machinery MCIC -HB-04 Jan. 1977
- (4) 例えば 大越，二宮訳 電気力学 産業図書
- (5) 電気工学ハンドブック

4. む す び

ヘリウム容器に発生する渦電流損失の値は、解析コード‘FEM3D’で求めた場合が17.7 watt.電磁方程式で求めた場合が12.2 watt となった。‘FEM3D’では、有限要素の大きさや、計算領域の広さが誤差要因となり、電磁方程式では、1次元モデル化や、時間平均の方法、有効長の大きさが誤差要因となる。しかしながら、それぞれの解析手法の誤差要因は、互に独立していると考えられるので、上記の2つの値は、近似的には有効であると考えられる。従って、渦電流損失はほぼ10~20 watt と見積って良い。

損失の低減には、容器壁突合せ部に絶縁層を設けて、 i_3 のモードを消すことが、実施の容易さから考えても有効な方法である。

謝 辞

計算コード‘FEM3D’の提供を始め、種々の御好意を賜った、大型トカマク開発部、二宮博正研究員及び、都築直久外来研究員に感謝致します。

日頃、御指導および御鞭達していただいている森茂核融合研究開発推進センター長および小幡行雄核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 細田, 島本; ORNL-Large Coil Taskにおける熱的問題の検討 JAERI-M 7546, 1978年2月
- (2) 吉田, 安藤, 島本; ORNL-LCT の磁界と応力の解析 JAERI-M 7543, 1978年2月
- (3) N.B.S Handbook on Materials for Superconducting Machinery MCIC -HB-04 Jan. 1977
- (4) 例えば 大越, 二宮訳 電気力学 産業図書
- (5) 電気工学ハンドブック