

JT-60SA 中心ソレノイドの構造設計

Structure Design of the Central Solenoid in JT-60SA

淺川 修二 土屋 勝彦 倉持 勝也 吉田 清

Shuji ASAKAWA, Katsuhiko TSUCHIYA, Masaya KURAMOCHI and Kiyoshi YOSHIDA

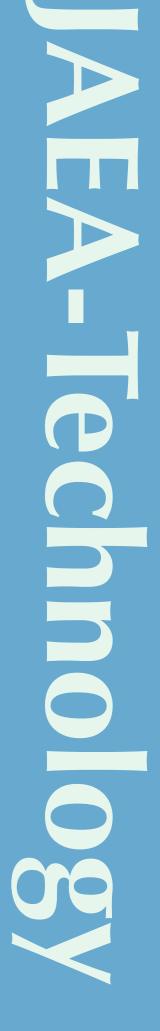
核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット

Division of Tokamak System Technology Fusion Research and Development Directorate

September 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(http://www.jaea.go.jp) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

JT-60SA 中心ソレノイドの構造設計

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット 淺川 修二*1、土屋 勝彦、倉持 勝也*2、吉田 清

(2009年6月23日 受理)

臨界プラズマ試験装置 JT-60U をサテライトトカマク(JT-60SA:JT-60 Super Advanced)として超伝導化する日本と EU との共同プロジェクトが推進されている。JT-60SA のマグネットシステムは中心ソレノイド(CS:central solenoid)、トロイダル磁場(TF:toroidal field)コイル、平衡磁場(EF:equilibrium field)コイルなどから成り、さらに CS は4つのモジュールから構成される。各モジュールには反発力や引力などの電磁力が発生し、また、熱収縮があるため支持構造物により予荷重を加える構造が必要となり、電磁力、予荷重や熱収縮に耐えうる構造が要求される。これに対応するため支持構造物と CS のジャケットの構造設計の解析と評価を行なった。

電磁力解析により得られた電磁力を用いて CS と支持構造物の全体解析とこの結果を用いた ジャケットの詳細な構造解析を行なった。室温状態や冷却状態で電磁力が作用した場合に支持 構造物や CS の間と上下に隙間が開かないように締め付けているタイ・プレートが強度と疲労評価ともに「核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格 (マグネット規格)」を満たすことを検証した。全体の構造解析の結果を基にした正配置モデルとちどり配置モデルのジャケットの詳細解析においても「マグネット規格」を満たしている。

那珂核融合研究所(駐在): 〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

※1 出向職員

※2 技術開発協力員

Structure Design of the Central Solenoid in JT-60SA

Shuji ASAKAWA^{*1}, Katsuhiko TSUCHIYA, Masaya KURAMOCHI^{*2} and Kiyoshi YOSHIDA

Division of Tokamak System Technology,
Fusion Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received June 23, 2009)

The upgrade of JT-60U magnet system to superconducting coils (JT-60SA: JT-60 Super Advanced) has been decided by parties of Japanese government (JA) and European commission (EU) in the framework of the Broader Approach (BA) agreement. The magnet system for JT-60SA consists of a central solenoid (CS), equilibrium field(EF) coils, toroidal field(TF) coils. The central solenoid consists the four winding pack modules. In order to counteract the thermal contraction as well as the electric magnetic repulsion and attraction together with other forces generated in each module, it is necessary to apply pre-loading to the support structure of the solenoid and to pursue a structure which is capable of sustaining such loading. In the present report, the structural design of the supporting structure of the solenoid and the jackets of the modules is verified analytically, and the results indicate that the structural design satisfies the "Codes for Fusion Facilities - Rules on Superconducting Magnet Structure -".

Keywords: JT-60SA, Central Solenoid, Structure Design, Jacket

^{¾1 Research Staff on Loan}

[™] 2 Collaborating Engineer

目 次

1	序論	論	
2	電磁	兹力解析	
	2.1	モデル	1
	2.2	物性値	
	2.3	境界条件	
	2.4	荷重条件、解析ケース	3
	2.5	解析結果	
3	全体	本解析	
,	3.1	モデル	
	3.2	物性値	
	3.3	境界条件	
		荷重条件	
	3.4		
	3.5 3.6	解析ケース解析結果	
	3.6.1		
	3.6.2		
	3.6.3		
	3.0.3	応力評価	
	3.7.1		
	3.7.2		レート
	3.7.2		
4	詳細	細解析	
	4.1	ジャケット 正列配置モデル	29
	4.1.1	.1 モデル	29
	4.1.2	.2 物性値	
	4.1.3	.3 境界条件	31
	4.1.4	.4 荷重条件	
	4.1.5	.5 解析ケース	
	4.1.6	.6 解析結果	
	4.1.7	.7 評価	36
	4.2	ジャケット ちどり配置モデル	43
	4.2.1	.1 モデル	43

JAEA-Technology 2009-044

	4.2.2	物性值	44
	4.2.3	境界条件	44
	4.2.4	荷重条件	45
	4.2.5	解析ケース	45
	4.2.6	解析結果	46
	4.2.7	評価	49
5	結論		54
謝鸹	<u>ځ</u>		55
参老	(文献		55

Contents

1	Int	roduction	1
2	Ele	ectric magnetic analysis	1
	2.1	Model	1
	2.2	Material properties	3
	2.3	Boundary conditions	3
	2.4	Loading conditions, Analysis cases	3
	2.5	Analysis results	4
3	W	Whole analysis	5
	3.1	Model	5
	3.2	Material properties	9
	3.3	Boundary conditions.	10
	3.4	Loading conditions	11
	3.5	Analysis cases.	11
	3.6	Analysis results	12
	3.6.1	Mount bracket and flexible plate	12
	3.6.2	Tie plate	16
	3.6.3	Insulation plate	18
	3.7	Stress evaluation.	22
	3.7.1	Standard of the stress evaluation	22
	3.7.2	Mount bracket and flexible plate	22
	3.7.3	Tie plate	25
4	I	Detail analysis	29
	4.1	Align model	29
	4.1.1	Model	29
	4.1.2	Material properties	30
	4.1.3	Boundary conditions	31
	4.1.4	Loading conditions	32
	4.1.5	Analysis cases	33
	4.1.6	Analysis results	33
	4.1.7	Stress evaluation.	36
	4.2	Misalign model.	43
	4.2.1	Model	43
	4.2.2	Material properties	44

JAEA-Technology 2009-044

	4.2.3	Boundary conditions	44
	4.2.4	Loading conditions	45
	4.2.5	Analysis cases	45
	4.2.6	Analysis results	46
	4.2.7	Stress evaluation	49
5	Co	oncluding Remarks	54
Acl	knowledg	ements	55
Ref	erences		55

表リスト

Table 2-1 Current values (MA)	4
Table 2-2 Electric magnetic force (MN)	4
Table 3-1 Material properties (1) (SUS316LN, Epoxy, FRP)	9
Table 3-2 Material properties (2) (VPI-G (G10), CS)	9
Table 3-3 Material properties (3) (Coefficient of the thermal expansion (instantaneous))	10
Table 3-4 Analysis cases of the whole analysis (1)	12
Table 3-5 Analysis cases of the whole analysis (2)	12
Table 3-6 Reaction force (MN)	13
Table 3-7 Maximum stress (Tresca stress) (MPa)	13
Table 3-8 Vertical force and stress of Tie plate	16
Table 3-9 Maximum stress (Tresca stress) of Tie plate (MPa)	17
Table 3-10 Stress intensity of the material properties (FM316LNL, FM316LNM)	22
Table 3-11 Stress category (MPa)	23
Table 3-12 Stress evaluation (4 K) (FM316LNM) (MPa)	23
Table 3-13 Stress category (MPa)	26
Table 3-14 Stress evaluation (4 K) (FM316LNM) (MPa)	27
Table 3-15 Stress evaluation (293 K) (FM316LNM) (MPa)	28
Table 4-1 Material properties (1) (SUS316LN, Resin+G)	30
Table 4-2 Material properties (2) (VPI-G (G10))	30
Table 4-3 Material properties (3) (Coefficient of the thermal expansion (instantaneous))	30
Table 4-4 Correspondence of the analysis conditions and results between the whole	
analysis and the detail analysis of the align model	32
Table 4-5 Analysis cases	33
Table 4-6 Tresca stress (MPa)	33
Table 4-7 Stress category (MPa)	36
Table 4-8 Stress evaluation (4 K) (FM316LNL) (MPa)	36
Table 4-9 Stress evaluation (293 K) (FM316LNL) (MPa)	37
Table 4-10 Correspondence of the analysis conditions and results between the align mode	1
and the misalign model	44
Table 4-11 Analysis cases	46
Table 4-12 Tresca stress (MPa)	46
Table 4-13 Stress category (MPa)	50
Table 4-14 Stress evaluation (4K) (FM316LNL) (MPa)	50

図リスト

Fig. 2-1 JT-60SA coils system (mm)
Fig. 2-2 Electric magnetic force Analysis model (20 degree)
Fig. 2-3 Boundary conditions (CS1)
Fig. 3-1 Elevation view of CS assembly (left : CS modules are not shown) (right : cross
section of a part around CS modules with pre-compress mechanism)5
Fig. 3-2 Elevation view of CS upper assembly
Fig. 3-3 Whole analysis model (1)6
Fig. 3-4 Whole analysis model (2) (Mount bracket, Flexible plate)
Fig. 3-5 Whole analysis model (3) (A upper part around CS modules with pre-compress
mechanism)
Fig. 3-6 Whole Analysis model (4) (A part around CS modules)
Fig. 3-7 Whole analysis model (5) (A lower part around CS modules with pre-compress
mechanism)
Fig. 3-8 Whole analysis boundary conditions (1)
Fig. 3-9 Whole analysis boundary conditions (2) (Elevation view of CS upper assembly)11
Fig. 3-10 Displacement (Whole analysis) (Mount bracket, Flexible plate) (m)
Fig. 3-11 Tresca stress (1) (Whole analysis) (Mount bracket, Flexible plate) (Pa)14
Fig. 3-12 Tresca stress (2) (Whole analysis) (Pa)
Fig. 3-13 Tresca stress (3) (Whole analysis) (Legs of the Mount bracket) (Pa)15
Fig. 3-14 Tresca stress (4) (Whole analysis) (Flexible plate) (Pa)
Fig. 3-15 Tresca stress (5) (Whole analysis) (Flexible plate) (Pa)
Fig. 3-16 Tresca stress of Tie plate (Whole analysis) (Case 2-0 : + Gravity) (Pa)17
Fig. 3-17 Location of the insulation plate between each CS modules
Fig. 3-18 Vertical direction stress of the insulation plates (1) (Case 0-1, Case 0-2, Case 0-3) \dots 19
Fig. 3-19 Vertical direction stress of the insulation plates (2) (Case 1, Case 2, Case 3)20
Fig. 3-20 Vertical direction stress of the insulation plates (3) (Case 4, Case 5)21
Fig. 3-21 Evaluation line (<i>line_a</i>) (Whole analysis)
Fig. 3-22 Evaluation line (<i>line_b</i>) (Whole analysis) (Legs of the Mount bracket)24
Fig. 3-23 Evaluation line (<i>line_c</i>) (Whole analysis)
Fig. 3-24 Evaluation lines of Tie plate (Whole analysis)
Fig. 4-1 Detail analysis align model (1)
Fig. 4-2 Detail analysis align model (2) (Zooming figure)
Fig. 4-3 Element coordinate systems of the turn insulation
Fig. 4-4 Boundary conditions (Detail analysis align model)
Fig. 4-5 Loading conditions (Detail analysis align model)
Fig. 4-6 Tresca stress (Case 0-2:+Gravity) (MPa)
Fig. 4-7 Tresca stress (Case 0-3: +Cooled down) (MPa)

JAEA-Technology 2009-044

Fig. 4-8 Tresca stress (Case 2 : Max. attraction force) (MPa)	34
Fig. 4-9 Tresca stress (2 nd layer, innermost) (MPa)	35
Fig. 4-10 Evaluation line (<i>line_j</i>) (2 nd layer, innermost)	37
Fig. 4-11 Mohr-Coulomb theory curves (align model : Case 0-3 :+Cooled down)	39
Fig. 4-12 Mohr-Coulomb theory curves (align model : Case 2 : Max. attraction force)	40
Fig. 4-13 Displacement (align model : Case 2 : Max. attraction force)	41
Fig. 4-14 First principal strain (Turn insulation) (align model : Case 2 : Max. attraction	
force)	41
Fig. 4-15 Location of the Mohr-Coulomb theory curves (Turn insulation)	42
Fig. 4-16 Detail analysis misalign model (1)	43
Fig. 4-17 Detail analysis misalign model (2) (Zooming figure)	43
Fig. 4-18 Boundary conditions (Detail analysis misalign model)	45
Fig. 4-19 Loading conditions (Detail analysis misalign model)	45
Fig. 4-20 Tresca stress (Case 0-2:+Gravity) (MPa)	47
Fig. 4-21 Tresca stress (Case 0-3:+Cooled down) (MPa)	47
Fig. 4-22 Tresca stress (Case 2 : Max. attraction force) (MPa)	47
Fig. 4-23 Tresca stress (Evaluation region) (Case 0-2 : + Gravity) (MPa)	48
Fig. 4-24 Tresca stress (Evaluation region) (Case 0-3:+Cooled down) (MPa)	48
Fig. 4-25 Tresca stress (Evaluation region) (Case 2 : Max. attraction force) (MPa)	49
Fig. 4-26 Evaluation regions and lines of the misalign model	51
Fig. 4-27 Mohr-Coulomb theory curves (misalign model : Case 0-3 :+Cooled down)	52
Fig. 4-28 Mohr-Coulomb theory curves (misalign model: Case 2: Max. attraction force)	53

This is a blank page.

1 序論

臨界プラズマ試験装置 JT-60U をサテライトトカマク(JT-60SA:JT-60 Super Advanced)として超 伝導化する日本と EU との共同プロジェクトが推進されている。JT-60SA のマグネットシステム は主に中心ソレノイド(CS:central solenoid)、トロイダル磁場(TF:toroidal field)コイル、平衡磁場 (EF:equilibrium field)コイルから成り、さらに CS は4つのモジュールから構成されている。各モジュールはそれぞれ独立した制御を行なうため、プラズマ形状や制御のタイミングによって、反発力や引力などの電磁力が発生する。また、CS モジュールと支持構造物との間に生じる熱収 縮差によるギャップを埋めるために予荷重を与える機構が必要となる。このため、CS と支持構造物には予荷重、電磁力や熱収縮に耐えうる強度を有することが求められる。 1)2)3)

電磁力解析により、各コイルとプラズマに電流が流されることにより **CS** に発生する電磁力と磁束密度を求め、全体解析と詳細解析に使用する。全体解析と詳細解析では、電磁力、予荷重と熱収縮が加えられた場合の支持構造物と **CS** のジャケットの構造解析と評価をそれぞれ行なう。⁴⁾

本報告書では、CS の支持構造物とモジュールのジャケットの構造設計を解析し、「核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格」 $^{5)}$ を満たすことを検証する。

なお、解析プログラムは、ANSYS 11.0 Release UP20070125 を使用する。

2 電磁力解析

2.1 モデル

電磁力解析の目的はCS、支持構造物の全体解析とジャケットの詳細解析を行なうに際しての、CS に働く電磁力を求めることである。

解析対象は CS、EF コイル、プラズマとする。CS は 4 つのモジュール(CS1~CS4)から構成され、6 つの EF コイル(EF1~EF6)は TF コイルを囲むように配置される。解析範囲として構造解析を念頭に対称性を考慮して 20° 分をモデル化する。なお、本解析でのプラズマは各コイルの電磁力を求めるためのものであるので、プラズマ形状は簡略化して矩形断面とする。解析対象である CS、EF コイル、支持構造物を Fig. 2-1 に、解析モデルを Fig. 2-2 に示す。

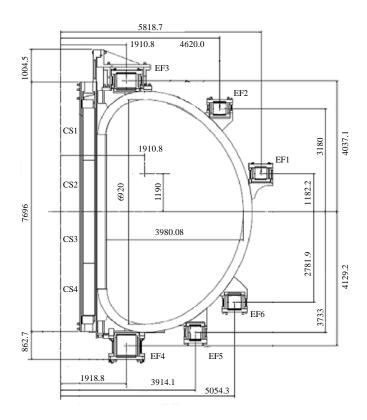
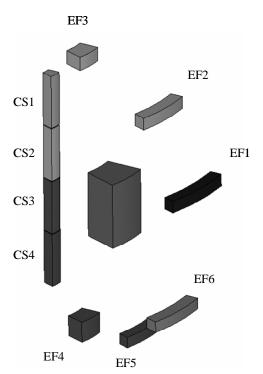


Fig. 2-1 JT-60SA coils system (mm)



Number of nodes: 19,615 Number of elements: 14,875

Element type: 3-D Coupled-Field

Solid SOLID5

Fig. 2-2 Electric magnetic force Analysis model (20 degree)

2.2 物性值

ANSYS による本手法では、「2.3 境界条件」に示すような方法により電流値を各コイルに設定するが、コイル断面での電流分布を均一にするために、各要素の電気抵抗率をコイルの中心軸からコイル中心までと要素中心までとの距離の逆比に応じて算出して設定する。

2.3 境界条件

ANSYS による本手法では、コイルに流される電流を境界条件として設定する。コイル断面の片方を等電位面としてカップリング(Coupling)(面内の条件の統一化)し、電流値を等電位面の主自由度に設定する。もう片面の電位を一定値に設定する。境界条件の例として CS1 の境界条件を Fig. 2-3 に示す。

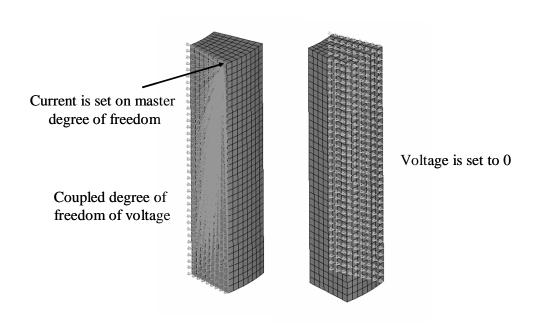


Fig. 2-3 Boundary conditions (CS1)

2.4 荷重条件、解析ケース

CS(CS1~CS4)、EF コイル(EF1~EF6)、プラズマに流される電流値の組み合わせにより「反発力最大(Max. repulsion force)」、「引力最大(Max. attraction force)」、「初期励磁(Initial magnetic excitation)」、「非平衡上最大(Max. vertical unbalance force (up))」、「非平衡下最大(Max. vertical unbalance force (down))」の5ケースを解析する。各ケースにおける各コイルとプラズマの電流値を Table 2-1 に示す。

Table 2-1 Current values (MA)

Case		Case 1	Case 2	Case 3 Case 4		Case 5
Condition		Max.	Max.	Initial	Max. vertical	Max. vertical
		repulsion	attraction magnetic		unbalance	unbalance
		force	force	excitation	force (up)	force (down)
	CS1	4.979	-8.629	11.419	-3.768	6.405
	CS2	0.825	-11.057	10.845	-9.409	2.737
	CS3	-5.280	-10.976	10.816	-7.941	-1.045
	CS4	5.064	-5.564	11.634	-11.069	2.713
	EF1	-1.933	-1.211	0.196	-1.940	-0.641
Coil	EF2	0.212	-2.733	0.002	-1.110	-1.078
	EF3	1.204	3.333	4.104	-0.828	1.369
	EF4	0.585	6.876	4.147	7.048	6.975
	EF5	2.297	-0.935	-0.123	-2.327	-1.804
	EF6	-2.699	-3.079	0.247	-1.863	-0.951
Plas	sma	2.900	5.500	0.000	5.500	2.900

2.5 解析結果

CS の各モジュール(CS1~CS4)に発生する半径方向と鉛直方向の電磁力を求める。特に、「4 詳細解析」で必要となる鉛直方向電磁力に注視する。Case 2 (引力最大) では、CS1,CS2 には下向き、CS3, CS4 には上向きの電磁力が発生し、値も鑑みると CS2 に大きな圧縮力が発生すると考えられる。CS(CS1~CS4)に発生する電磁力を Table 2-2 に示す。

Table 2-2 Electric magnetic force (MN)

Case	Condition	Direction	Coil				
			CS1	CS2	CS3	CS4	
Case 1	Max. repulsion force	Radial	32.001	2.256	7.931	25.562	
		Vertical	-0.505	2.806	6.752	-9.407	
Case 2	Max. attraction force	Radial	97.313	167.259	149.947	33.397	
		Vertical	-39.721	-6.421	23.211	29.356	
Case 3	Initial magnetic	Radial	224.307	223.988	223.430	228.684	
	excitation	Vertical	-37.885	1.012	-1.562	39.237	
Case 4	Max. vertical unbalance	Radial	29.340	108.888	91.841	119.575	
	force (up)	Vertical	-11.269	-11.283	-4.772	45.153	
Case 5	Max. vertical unbalance	Radial	56.150	18.377	-3.746	15.707	
	force (down)	Vertical	-6.007	6.460	-0.106	-3.928	

3 全体解析

3.1 モデル

解析対象は CS (絶縁板も含む)、支持構造物 (バッファ・ゾーン、キー・ブロック、ウェッジ、タイ・プレート)、フレキシブル・プレート、マウント・ブラケットとする。 CS モジュールは対地絶縁され、さらに CS モジュール間(CS-CS)も絶縁されている。 CS の上部と下部の支持構造物はバッファ・ゾーン、キー・ブロック、ウェッジにより成り、タイ・プレートにより締め付け、予荷重を与える構造である。 CS と支持構造物の全体を Fig. 3-1 に示す。左図は CS を除く支持構造物の鳥瞰図、右図は断面図である。 TF コイルに取り付けたマウント・ブラケットでフレキシブル・プレートを介して CS を吊るす構造と成っている。

解析範囲は対称性を考慮して 20°分とする。マウント・ブラケット、フレキシブル・プレート、CS 上部の支持構造物の鳥瞰図を Fig. 3-2 に示す。 CS、絶縁板、バッファ・ゾーンは 20°分、タイ・プレート、キー・ブロック、ウェッジ、フレキシブル・プレート、マウント・ブラケットは 1/2 が解析範囲となる。 Fig. 3-3 に解析モデルの全体を示す。 CS と CS-CS 絶縁間、 CS-CS 絶縁と対地絶縁間、対地絶縁とバッファ・ゾーン間では接触を考慮する。 また、タイ・プレートとキー・ブロックとの接合部の垂直面はボルトにより締め付けられているので一体とし、水平部分は接触を考慮する。 Fig. 3-4 にマウント・ブラケット、フレキシブル・プレート部分を示す。 Fig. 3-4、 Fig. 3-5 に Fig. 3-2 に対応した CS 上部の支持構造物の解析モデルを示す。 Fig. 3-6 に CS モジュール間のモデルを示し、 Fig. 3-7 に支持構造物下部のモデルを示す。

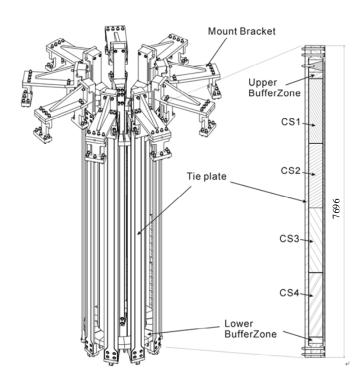


Fig. 3-1 Elevation view of CS assembly (left: CS modules are not shown)
(right: cross section of a part around CS modules with pre-compress mechanism)

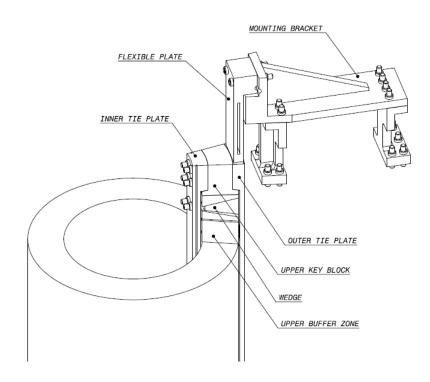


Fig. 3-2 Elevation view of CS upper assembly

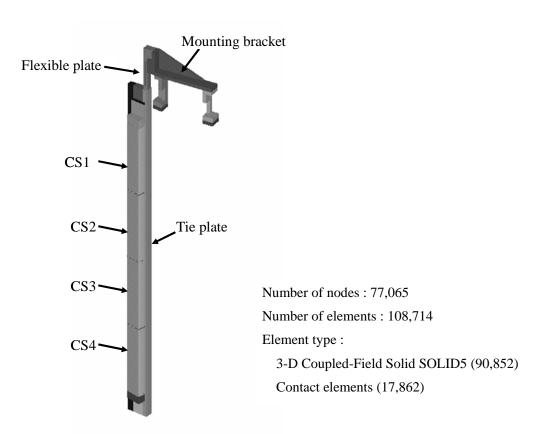


Fig. 3-3 Whole analysis model (1)

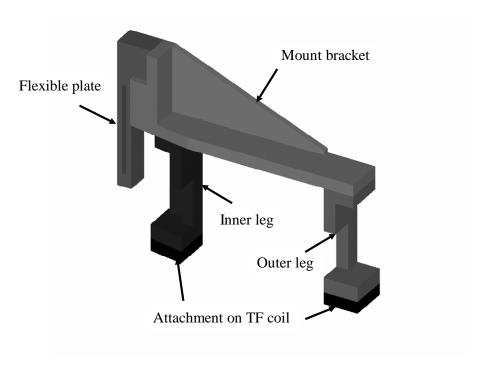


Fig. 3-4 Whole analysis model (2) (Mount bracket, Flexible plate)

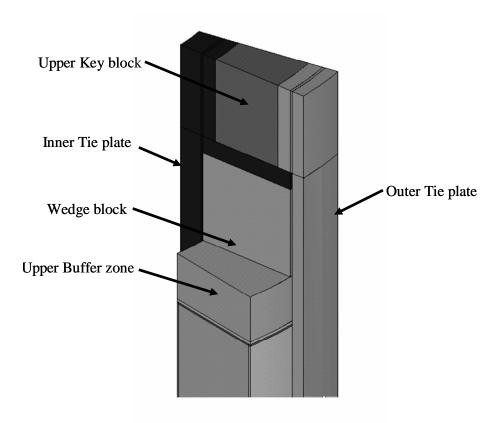


Fig. 3-5 Whole analysis model (3) (A upper part around CS modules with pre-compress mechanism)

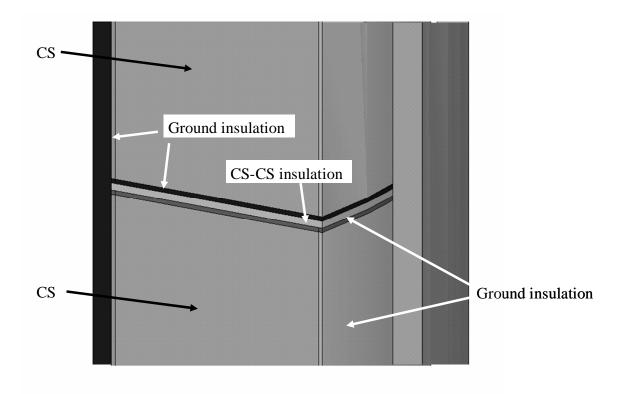


Fig. 3-6 Whole Analysis model (4) (A part around CS modules)

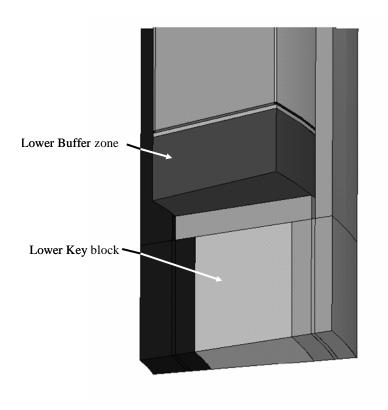


Fig. 3-7 Whole analysis model (5) (A lower part around CS modules with pre-compress mechanism)

3.2 物性值

CS には等価剛性、等価密度を用いる。CS 間の絶縁はエポキシ、FRP を、対地絶縁は VPI-G を使用し、他は SUS316LN を使用する。対地絶縁と CS の材料は異方性とし、積層方向は厚さ方向とする。各部品に使用している材料の物性値(密度、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率)を Table 3-1~Table 3-3 に示す。熱膨張率は解析プログラムにおいて瞬間熱膨張率から参照温度を考慮して平均熱膨張率が算出されて、解析に使用される。Table 3-3 に瞬間熱膨張率を示している。

Table 3-1 Material properties (1) (SUS316LN, Epoxy, FRP)

Material		Epoxy, FRP					
Component	Wedge	Buffer	Key	Tie	Flexible	Mount	CS-CS
	block	zone	block	plate	plate	bracket	insulation
Density (kg/m ³)		2000					
Young's modulus (GPa)		10					
Poisson's ratio		0.33					
Thermal expansion (%)	Thermal expansion (%) Table 3-3 Material properties (3)						0.5
(293 K to 4 K)	(293 K to 4 K)						

Table 3-2 Material properties (2) (VPI-G (G10), CS)

	VPI-G	(G10)	CS ^{*1}		
Component			CS1, CS2, CS3, CS4		
)	200	00	5476		
E _x	12	20	36.58		
E _y	20	20	100.6		
E_z	20	12	37.97		
G_{xy}	6	6	17.28		
G_{yz}	6	6	17.3		
G_{zx}	6	6	5.938		
ν _{xy}	0.33	0.17	0.098		
	0.17	0.33	0.094		
ν_{zx}	0.33	0.33	0.431		
α_{x}	0.75	0.25	0.346		
$\alpha_{ m y}$	0.25	0.25	0.3		
αz	0.25	0.75	0.346		
Material direction			$x:X(R), y:Y(\theta),z:Z$		
	$\begin{array}{c} E_x \\ E_y \\ E_z \\ G_{xy} \\ G_{yz} \\ G_{zx} \\ \nu_{xy} \\ \nu_{yz} \\ \nu_{zx} \\ \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		

*1 : Equivalent stiffness

Table 3.3 Waterian properties (3) (Coefficient of the thermal expansion (instantaneous))											
Temp.	4	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
α	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	
Temp.	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
α	0.8	1.	1.	1.1	1.2	1.2	1.4	1.3	1.4	1.5	
Temp.	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
α	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5452	1.5548	1.4	1.5	
Temp.	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	
0/	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	

Table 3-3 Material properties (3) (Coefficient of the thermal expansion (instantaneous))

Temp.: Temperature (K)

 α : Coefficient of thermal expansion (instantaneous) ($\times 10^{-5}$ /K)

3.3 境界条件

周方向対称面には周方向対称条件を課す。マウント・ブラケット脚部の取り付け側を半径(R)、鉛直(Z)方向拘束する。冷却時の条件としてマウント・ブラケット脚部に熱収縮による半径方向の強制変位をトーラス内側方向に与える。強制変位量は脚部の半径、熱膨張率、参照温度からの温度差より算出し、内側脚部では-0.00377 m、外側脚部では-0.00727 m とする。境界条件を Fig. 3-8、Fig. 3-9 に示す。Fig. 3-8 には CS と支持構造物の境界条件を上方より示し、Fig. 3-9 にはマウント・ブラケット、フレキシブル・プレートと CS 上部の支持構造物の境界条件を示す。

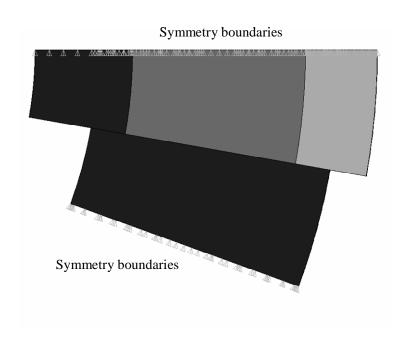


Fig. 3-8 Whole analysis boundary conditions (1)

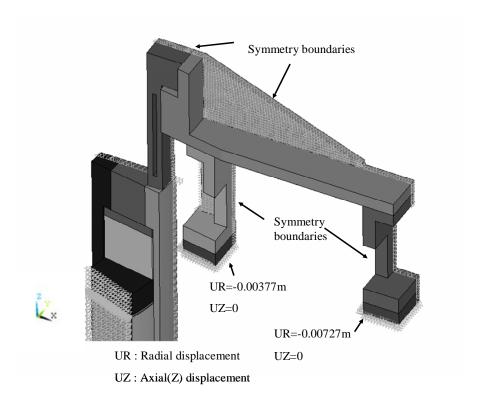


Fig. 3-9 Whole analysis boundary conditions (2) (Elevation view of CS upper assembly)

3.4 荷重条件

荷重として、タイ・プレートによる締め付け(Constriction)、自重(+Gravity)、冷却(+Cooled down) 、電磁力(Electric magnetic force)を与える。タイ・プレートによる締め付けは温度差 Δ T = 85 K による「焼きばめ」で模擬する。具体的には、タイ・プレート の参照温度を 378 K とし、他を 293 K (室温:20 °C) とする。締め付けと自重を加えた状態での温度は 293 K とする。冷却時では温度を 293 K から 4 K まで下げる。「2 電磁力解析」で求めた各ケースの電磁力を CS に与える。

3.5 解析ケース

Case 0-1 はタイ・プレートに参照温度からの温度差(Δ T=85 °C)を加えることにより締め付ける解析である。Case 0-2 では、さらに自重を与える。Case 0-3 は Case 0-2 に対して熱荷重として温度を 4 K に設定する。Case 0-1,0-2 での温度は 293 K である。Case 1~5 は、Case 0-3 の状態にそれぞれ「反発力最大」、「引力最大」、「初期励磁」、「非平衡上最大」、「非平衡下最大」の電磁力を加える。解析ケースを Table 3-4 に示す。表中の「〇」印は荷重を加えていることを示す。

Table 3-4 Analysis cases of the whole analysis $(1)^{*1}$

Case		Case 0-1 Case 0-		Case 0-3
	Condition	Constriction +Gravity +Cooled d		+Cooled down
	Constriction	0	0	0
Load	Gravity	_	0	0
	Cooled down	_	_	0

*1: "O"; loaded

Table 3-5 Analysis cases of the whole analysis (2)*1

	Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
			Max.	Initial	Max.	Max.
	Condition	repulsion	attraction	magnetic	vertical	vertical
		force	force	excitation	unbalance	unbalance
					force(up)	force(down)
	Constriction	0	0	0	0	0
Gravity		0	0	0	0	0
	Cooled down	0	\circ	0	0	0
	Max. repulsion force	0	_	_	_	_
	Max. attraction force	_	0	_	_	_
Electric	Initial magnetic	_	_	0	_	_
magnetic	excitation					
force	Max. vertical unbalance	_	_	_	0	_
	force (up)					
	Max. vertical unbalance	_	_	_	_	0
	force (down)					

*1: "O"; loaded

3.6 解析結果

3.6.1 マウント・ブラケットとフレキシブル・プレート

非平衡上最大荷重が働く場合のマウント・ブラケットとフレキシブル・プレートの応力とマウント・ブラケット脚部の TF コイルとの取り付け部に働く力(取り合い部分に働く力)を求める。内側の脚は非平衡上荷重により鉛直上側に押し上げられ、外側の脚は逆に鉛直下側に押さえつけられる。半径方向の反力は CS 部の構造から周方向の力で一部を負担していると考えられる。取り付け部分に働く力としてマウント・ブラケット脚部に働く拘束反力(マウント・ブラケット1つ当たりを)を Table 3-6 に示す。

マウント・ブラケットの脚部には冷却による TF コイル側の熱収縮による変形とフレキシブル・プレートの下部に加わる非平衡上最大荷重が働く。このため、フレキシブル・プレートとマウント・ブラケットの接続部分、マウント・ブラケットを支えるリブ部分、内側の脚部分に大き

な力が働く。最大応力(トレスカ応力)はフレキシブル・プレートの吊り部に発生し 363 MPa である。この部分は十分な大きさがあるため強度的には十分と考えられる。マウント・ブラケットの上部(脚部を除いた部分)の最大応力は取り付け上部に発生し 312 MPa である。リブ部の最大応力を抑え、リブ全体に応力が分布するようにリブの厚さと長さの最適化を図っている。マウント・ブラケットの脚部とフレキシブル・プレートの最大応力は、それぞれ 304 MPa と 254 MPa であり、脚部の付け根とプレートの上部の付け根に発生している。

変形図を Fig. 3-10 に示す。各部の最大応力を Table 3-7 に示す。フレキシブル・プレートとマウント・ブラケットの全体、マウント・ブラケット上部、脚部、フレキシブル・プレート、プレート部の応力分布(トレスカ応力)をそれぞれ Fig. 3-11~Fig. 3-15 に示す。

Table 3 6 Reaction force (WIV)							
Location In		Inner leg		er leg			
Direction	Radial	Vertical	Radial	Vertical			
Force	0.111	-2.433	-0.158	0.570			

Table 3-6 Reaction force (MN)

Table 3-7 Maximum stress (Tresca stress) (MPa)

Regi	Stress	
Mount bracket,	363	
Mount bracket	Mount bracket Whole	
Legs		304
Flexible plate	Whole	363
	Plates	

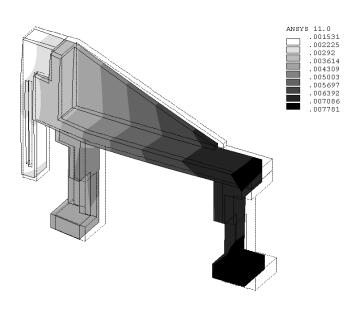


Fig. 3-10 Displacement (Whole analysis) (Mount bracket, Flexible plate) (m)

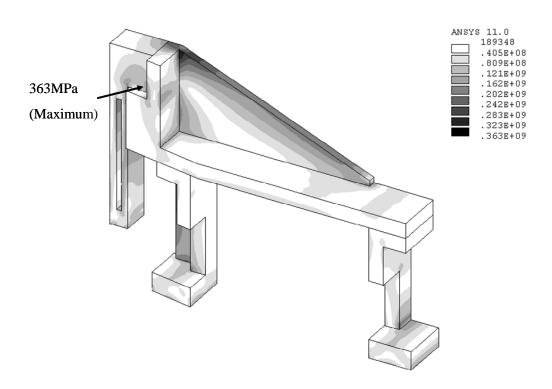


Fig. 3-11 Tresca stress (1) (Whole analysis) (Mount bracket, Flexible plate) (Pa)

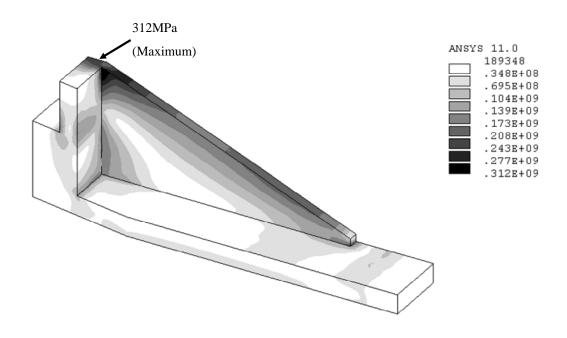


Fig. 3-12 Tresca stress (2) (Whole analysis) (Pa)

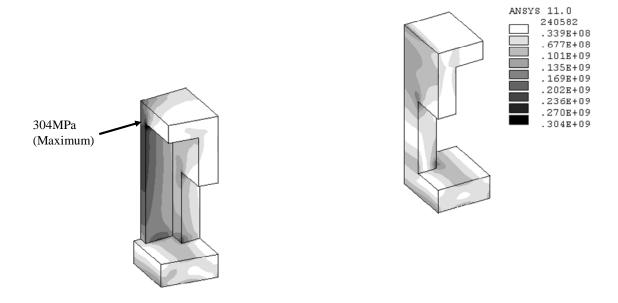


Fig. 3-13 Tresca stress (3) (Whole analysis) (Legs of the Mount bracket) (Pa)

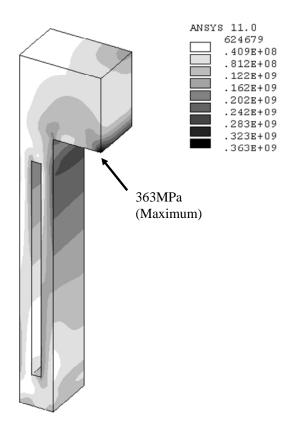


Fig. 3-14 Tresca stress (4) (Whole analysis) (Flexible plate) (Pa)

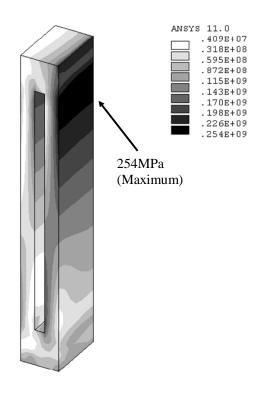


Fig. 3-15 Tresca stress (5) (Whole analysis) (Flexible plate) (Pa)

3.6.2 タイ・プレート

タイ・プレートの直線部分には鉛直方向応力を主な応力としてほぼ均一に応力が生じている。 鉛直方向応力の最大値は Case 0-2(+自重)のケースに発生し、144 MPa である。最大応力(トレスカ応力)は Case 0-2 にタイ・プレート上部の CS を締め付けているキー・ブロックとの接触部分に発生し、566 MPa である。冷却時(Case 0-3)には CS の熱収縮により応力が下がる。電磁力を加えたケースでも CS を収縮させる力が働くため、応力が下がっていると考えられる。タイ・プレートの直線部分に鉛直に働く力と相当する鉛直方向応力を Table 3-8 に示す。タイ・プレート取り付け部に発生する最大応力を Table 3-9 に示す。最大応力が発生する Case 0-2 の応力(トレスカ応力)分布を Fig. 3-16 に示す。

Condition Case Inner Outer Force Stress Force Stress (MN) (MPa) (MN) (MPa) Case 0-1 Constriction 2.032 129 1.684 142 Case 0-2 +Gravity 2.016 128 2.729 144 Case 0-3 +Cooled down 1.242 79 2.708 89 Case 1 Max. repulsion force 1.188 75 1.645 86

Table 3-8 Vertical force and stress of Tie plate

Case 2	Max. attraction force	0.388	25	0.464	24
Case 3	Initial magnetic excitation	0.262	17	0.463	24
Case 4	Max. vertical unbalance	0.504	32	0.420	24
	force (up)				
Case 5	Max. vertical unbalance	1.187	75	1.712	90
	force (down)				

Table 3-9 Maximum stress (Tresca stress) of Tie plate (MPa)

Case	Condition	Tie plate	
		Inner	Outer
Case 0-1	Constriction	528	218
Case 0-2	+Gravity	531	217
Case 0-3	+Cooled down	378	153
Case 1	Max. repulsion force	364	149
Case 2	Max. attraction force	145	153
Case 3	Initial magnetic excitation	128	133
Case 4	Max. vertical unbalance force (up)	153	211
Case 5	Max. vertical unbalance force (down)	370	151

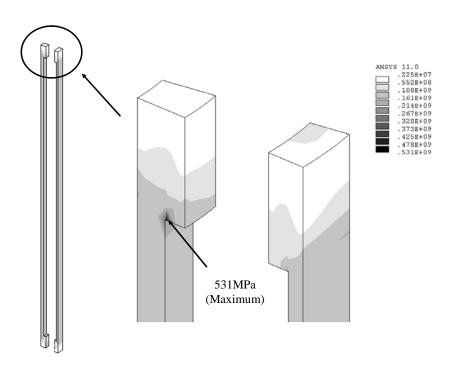


Fig. 3-16 Tresca stress of Tie plate (Whole analysis) (Case 2-0 : + Gravity) (Pa)

3.6.3 絶縁板

CS 間及び CS 上下の絶縁板と CS モジュール間には隙間を発生させないようにする必要がある。特に、CS モジュール間の接触は確保されていることが求められる。Case 4 (非平衡上最大)の上部絶縁板の一部を除いて、各ケースとも CS 間及び CS 上下の絶縁板の圧縮は確保されている。最も大きな圧縮応力は Case 2 (引力最大) における CS2 と CS3 間の絶縁板に発生し、-43.3 MPa である。Case 4 では、上向きの電磁力が働いているため、外側の上部にフレキシブル・プレートがある部分では圧縮応力が大きく、内側で引張応力が見られる。最大値は 0.448 MPa と圧縮応力と比較すると大きな値ではない。上向き電磁力が働いているため、締め付け力を小さくしても引張応力の範囲は急激に広がらない。

しかし、Case 3 (初期励磁) においては、上部の絶縁板に引張応力は見られないが、5 MPa 以下の圧縮応力がほとんどを占めている。このため、締め付けを模擬している温度差 Δ T を 5 K 下げた Δ T=80 K でさえ、全体で圧縮は確保されない。

CS 間及び CS 上下の絶縁板に働く鉛直方向応力を Fig. 3-18~Fig. 3-20 に示す。絶縁板の位置を Fig. 3-17 に示す。絶縁板の鉛直方向応力は、計算上「まだら」な分布も見られが、最大値と最小値を見ることで、安全側の評価が得られると考えられる

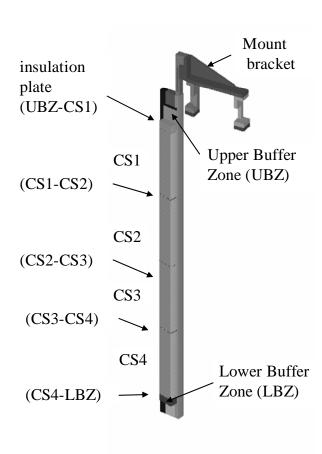
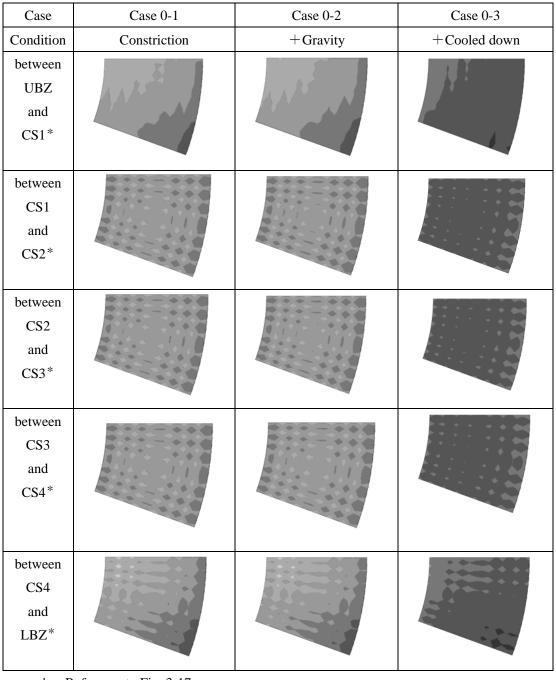


Fig. 3-17 Location of the insulation plate between each CS modules



* : Reference to Fig. 3-17

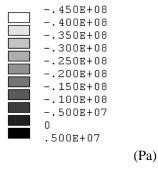


Fig. 3-18 Vertical direction stress of the insulation plates (1) (Case 0-1, Case 0-2, Case 0-3)

Case	Case 1	Case 2	Case 3
Condition	Max. repulsion force	Max. attraction force	Initial magnetic excitation
between UBZ and CS1*			
between CS1 and CS2*			
between CS2 and CS3*			
between CS3 and CS4*			
between CS4 and LBZ*	of war at Fig. 2.17		

* : Reference to Fig. 3-17

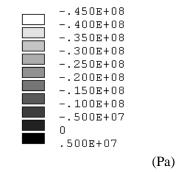


Fig. 3-19 Vertical direction stress of the insulation plates (2) (Case 1, Case 2, Case 3)

Case	Case 4	Case 5
Condition	Max. vertical unbalance	Max. vertical unbalance
	force (up)	force (down)
between		
UBZ		
and		
CS1*		
between		
CS1		
and		
CS2*		
between	000-000	
CS2		
and		
CS3*		
between		
CS3		
and		
CS4*		1
between		
CS4		
and		
LBZ*		
	7	

* : Reference to Fig. 3-17

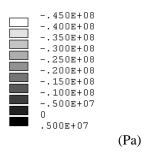


Fig. 3-20 Vertical direction stress of the insulation plates (3) (Case 4, Case 5)

3.7 応力評価

3.7.1 応力評価基準

応力評価基準には「社団法人 日本機械学会 核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格」⁵⁾ (以下「マグネット規格」という) を準用する。

4 K、296 K の材料 FM316LNL と FM316LNM の設計応力強さ S_m などを Table 3-10 に示す。なお、ここでは、一次応力(一般膜応力、曲げ応力)に対応した荷重を一次荷重、二次応力(膜応力、曲げ応力)に対応した荷重を二次荷重と称する。

応力分類の記号を以下に示す。

 P_m : 一般膜応力(General membrane stress)

 P_b : 曲げ応力(Bending stress) F: ピーク応力(Peak stress) O: 二次応力(Secondary stress)

Table 3-10 Stress intensity of the material properties (FM316LNL, FM316LNM)

Temperature (K)	4		296			
Material	FM316LNL	FM316LNM	FM316LNL	FM316LNM		
Design yield strength S_y^{*1} (MPa)	500	700	210	245		
Design tensile strength S_u^{*2} (MPa)	1340	1385	520	550		
Additional coefficient $ extbf{\emph{K}}^{*3}$	1.0	1.0	1.0	1.0		
Design stress intensity S_m^{*4} (MPa)	333	467	140	163		
Peak stress intensity $2S_a^{*5}$ (MPa)	893	893	_	_		

- *1 : Values for the "Table FM-2710-2 design yield strength at every 50 $^{\circ}$ C(K)(MPa) FM316LNL , FM316LNM" for 4 K and 296 K. The values for "thickness of 200(mm) or less" are used.
- *2 : Values for the "Table FM-2710-3 design tensile strength at every 50 $^{\circ}$ C(K)(MPa) FM316LNL , FM316LNM" for 4 K and 296 K. The values for "thickness of 200(mm) or less" are used.
- *3: Depend on the "Table FM-2221 additional coefficient K limit set 1 (normal operation)".
- *4 : The design stress strength $S_m = \text{Min}[2/3S_y, 1/2S_u]$ depend on the "FM-3120 value of the design stress strength".
- *5 : Depend on the "Table 31-1 digital value of the design fatigue curve (Fig. 31-1) for austenitic stainless steel at -269 $^{\circ}$ C(4 K) as designed on the basis of the characteristics at extremely low temperatures". Strength with respect to repeated peak stress corresponding to the total amplitude for the permissible number of 36,000 repetitions.

3.7.2 マウント・ブラケットとフレキシブル・プレート

マウント・ブラケット、マウント・ブラケット脚部、フレキシブル・プレートに最も大きな荷重が加わる Case 4 (非平衡上最大) について評価する。応力評価位置はフレキシブル・プレート、マウント・ブラケット、マウント・ブラケット脚部の応力の高い部分より選択する。マウント・ブラケットの上部はリブの上部付け根、マウント・ブラケット脚部は内側の脚付け根部、フレキシ

ブル・プレートは上部プレートの付け根部とする。応力評価位置を Fig. 3-21~Fig. 3-23 に示す。 応力評価結果によれば、一次応力は大きな場所でも許容値の約 2 分の 1 であり、材料 FM316LNM の許容値を満たす。二次応力やピーク応力を含む応力振幅も設計疲労の許容値を十分に満たす。 いずれも、応力評価結果は「マグネット規格」の許容値を満たす。応力評価に必要となるケース の応力分類結果を Table 3-11 に示す。応力評価結果を Table 3-12 に示す。

Table 3-11 Stress category (MPa) *2

			Membrane	Bending	Membrane	Peak	Total
Case	Condition	Location	stress*1	stress	+Bending	stress*1	stress
					stress*1		
			P_m	P_b	$P_m + P_b$	$oldsymbol{F}$	
Case		line_a	4.7	1.1	5.8	0.7	6.5
0-3	+Cooled down	line_b	9.4	1.9	11.3	0.8	12.1
		line_c	1.5	22.4	23.9	1.6	25.5
Case	Max. vertical	line_a	184.1	36.2	220.3	26.7	247.0
4-1 st	unbalance force	line_b	197.5	39.5	237.0	16.9	253.9
	(up) 1 st load*3	line_c	116.7	139.7	256.4	4.2	260.6
Case	Max. vertical	line_a	182.9	35.9	218.8	26.5	245.3
4	unbalance force	line_b	198.2	39.5	237.7	16.9	254.6
	(up)*3	line_c	122.6	132.5	255.1	3.4	258.5

*1 : Calculated using the feature of ANSYS.

*2 : Tresca stress

*3: 1st load

Table 3-12 Stress evaluation (4 K) (FM316LNM) (MPa)

	1	I		I	
	Membrane	Membrane	Primary +	Primary+	
	stress	+Bending	Secondary	Secondary	
		stress	stress	+ Peak	
				Stress	
Location			$<\!\!P_m\!+\!\!P_b$	$< P_m + P_b$	Estimation*3
	P_m	P_m+P_b	$+Q>^{*1}$	$+Q+F>^{*1}$	
		Limit of str	ess intensity		
	KS _m	$1.5KS_m$	$3S_m$	$2S_a^{*2}$	
	467	700	1400	893	
line_a	184.1	184.1*4	178.2*4	204.0*4	0
line_b	197.5	197.5*4	188.8*4	204.9*4	0
	116.7	256.4	231.2	233.0	
line_c	110.7	230.4	231.2	255.0	

^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

- *2 : Strength with respect to repeated peak stress corresponding to the total amplitude for the permissible number of 36,000 repetitions.
- *3 : Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNM". The evaluation is for 4 K.
- *4 : The estimation spans the symmetric surface, and it is necessary to exercise extra caution in performing stress estimation which includes the bending stress.

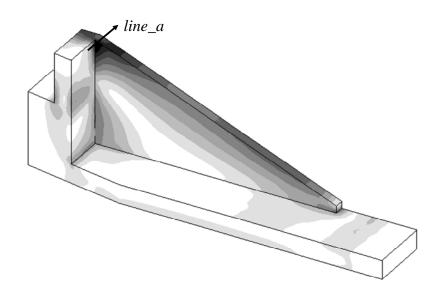


Fig. 3-21 Evaluation line (*line_a*) (Whole analysis)

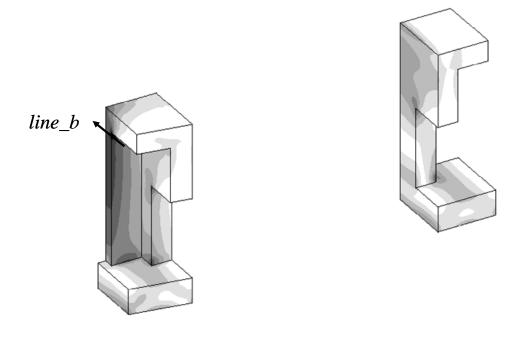


Fig. 3-22 Evaluation line (*line_b*) (Whole analysis) (Legs of the Mount bracket)

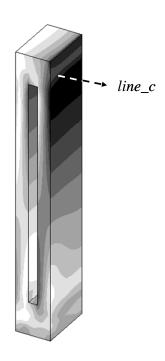


Fig. 3-23 Evaluation line (*line c*) (Whole analysis)

3.7.3 タイ・プレート

タイ・プレートに高い鉛直方向の力が発生しているケースについて評価する。冷却時では Case 1 (反発力最大) と Case 5 (非平衡下最大)、室温(293 K)では Case 0-2 (+自重) である。一次応力を評価するために Case 1 と Case 5 に対応し、熱荷重 (冷却: 4K) を含まないケースを $1-1^{st}$ 、 $5-1^{st}$ とする。評価位置は高い応力 (トレスカ応力) が発生しているタイ・プレートがキー・ブロックを締め付けている部分と直線部分の中間に設ける。応力評価位置を Fig. 3-24 に示す。

応力評価結果によれば、冷却において一次応力は材料 FM316LNM の許容値の 3分の 1 以下であり、設計疲労を評価するための二次応力やピーク応力を含む応力振幅も許容値を十分に満たす。293 K の応力評価においては設計疲労の評価を必要としないため一次応力についてのみ評価するが、材料 FM316LNM の許容値を満たしている。いずれも、材料 FM316LNM では「マグネット規格」の許容値を満たす。各ケースの応力分類結果を Table 3-13 に、4 K \ge 293 K の応力評価結果をそれぞれ Table 3-14、Table 3-15 に示す。

Table 3-13 Stress category (MPa)*2

				Membrane	Bending	Membrane	Peak	Total
Case	Condition	Locati	on	stress*1	stress	+Bending	stress*1	stress
						stress*1		
				P_{m}	P_b	$P_m + P_b$	F	
			line_d	86.4	106.6	193.0	208.2	401.2
		inner	line_e	151.5	53.2	204.7	100.2	304.9
Case	+Gravity		line_f	128.7	5.6	134.3	2.0	136.3
0-2			line_g	52.9	45.7	98.6	83.3	181.9
		outer	line_h	138.6	23.3	161.9	34.6	196.5
			line_i	143.5	1.7	145.2	0.0	145.2
			line_d	61.7	79.5	141.2	172.1	313.3
		inner	line_e	96.6	45.7	142.3	101.7	244.0
Case	+Cooled		line_f	79.3	3.3	82.6	0.1	82.7
0-3	down		line_g	50.9	32.4	83.3	61.5	144.8
		-	line_h	82.6	24.0	106.6	26.9	133.5
			line_i	88.6	1.1	89.7	0.0	89.7
			line_d	84.0	103.7	187.7	200.9	388.6
	Max.	inner	line_e	147.4	51.8	199.2	97.4	296.6
Case	repulsion		line_f	125.2	5.5	130.7	2.0	132.7
1-1 st	force		line_g	57.2	54.5	111.7	80.2	191.9
	1 st load	outer	line_h	136.7	22.8	159.5	33.9	193.4
			line_i	141.5	1.6	143.1	0.0	143.1
	Max.		line_d	84.0	104.5	188.5	203.9	392.4
	vertical	inner	line_e	147.0	53.8	200.8	98.7	299.5
Case	unbalance		line_f	125.2	5.8	131.0	0.2	131.2
5-1 st	force		line_g	53.3	51.0	104.3	75.3	179.6
	(down)	outer	line_h	139.7	22.6	162.3	31.6	193.9
	1 st load		line_i	145.1	1.3	146.4	0.0	146.4
			line_d	59.4	76.7	136.1	166.2	302.3
		inner	line_e	87.4	30.0	117.4	73.5	190.9
Case	Max.		line_f	75.9	3.4	79.3	0.1	79.4
1	repulsion		line_g	49.3	31.0	80.3	59.8	140.1
	force	outer	line_h	80.6	23.5	104.1	26.1	130.2
			line_i	86.5	1.0	87.5	0.0	87.5
	Max.		line_d	59.5	77.7	137.2	169.1	306.3
	vertical	inner	line_e	87.1	31.9	119.0	74.6	193.6

Case	unbalance		line_f	75.9	3.7	79.6	1.3	208.2
5	force		line_g	42.1	25.4	67.5	54.5	122.0
	(down)	outer	line_h	83.7	22.9	106.6	24.0	130.6
			line_i	90.0	0.8	90.8	0.0	90.8

^{*1 :} Calculated using the feature of ANSYS

Table 3-14 Stress evaluation (4 K) (FM316LNM) (MPa)

				Membrane	Membrane	Primary+	Primary+		
				stress	+Bending	Secondary	Secondary		
					stress	Stress	+ Peak		
							Stress	Estima-	
Case	Condition	Loc	ation			$< P_m + P_b$	$< P_m + P_b$	tion*3	
				P_m	P_m+P_b	$+Q>^{*1}$	$+Q+F>^{*1}$		
					Limit of stress intensity				
				KS _m	$1.5KS_m$	$3S_m$	$2S_a^{*2}$		
				467	700	1400	893		
			line_d	84.0	187.7	81.1	11.0	0	
	Max.	inner	line_e	147.4	199.2	99.7	53.1	0	
Case 1	repulsion		line_f	125.2	130.7	57.2	3.3	0	
	force		line_g	57.2	111.7	5.5	57.4	0	
		outer	line_h	136.7	159.5	67.6	3.3	0	
			line_i	141.5	143.1	64.7	2.2	0	
			line_d	84.0	188.5	4.0	7.0	0	
	Max. vertical	inner	line_e	147.0	200.8	23.3	50.4	0	
Case 5	unbalance		line_f	125.2	131.0	3.0	125.5	0	
	force (down)		line_g	53.3	104.3	15.8	22.8	0	
		outer	line_h	139.7	162.3	0.0	2.9	0	
			line_i	145.1	146.4	1.1	1.1	0	

^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

^{*2 :} Tresca stress.

^{*2 :} Strength with respect to repeated peak stress corresponding to the total amplitude for the permissible number of 36,000 repetitions.

^{*3 :} Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNM". Estimation performed at $4~\rm K$.

				Membrane	Membrane	
				stress	+Bending	
Case					stress	
		Loca	ition	P_m	P_m+P_b	Estimation*2
				Limit of str	ess intensity	
				KS_m	$1.5KS_m$	
				163	245	
			line_d	86.4	193.0	0
		inner	line_e	151.5	204.7	0
Case 0-2	+Gravity		line_f	128.7	134.3	0
		outer	line_g	52.9	98.6	0
			line_h	138.6	161.9	0
			line_i	143.5	145.2	0

Table 3-15 Stress evaluation (293 K) (FM316LNM) (MPa)

^{*2 :} Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNM". Estimation performed at 293 K.

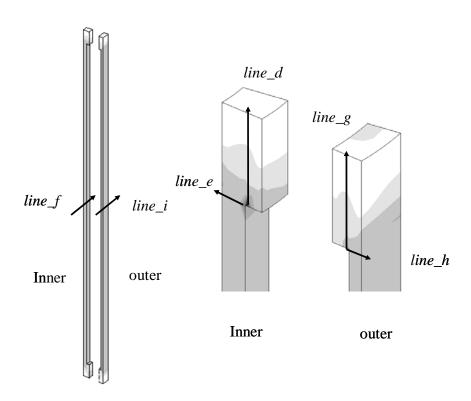


Fig. 3-24 Evaluation lines of Tie plate (Whole analysis)

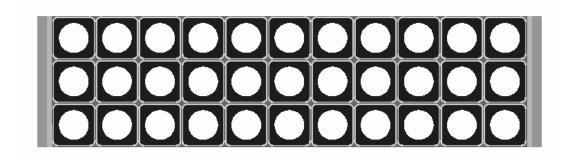
^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

4 詳細解析

4.1 ジャケット 正列配置モデル

4.1.1 モデル

CS のジャケットの正列配置モデルの詳細な応力評価を目的とした解析である。解析対象は CS の 3 層分のジャケット、ターン絶縁、対地絶縁である。軸対称モデルである。ジャケットを ターン絶縁で巻き、充填層で満たし、積層する構造である。内外面は対地絶縁されている。解析モデルを Fig. 4-1 に、拡大を Fig. 4-2 に示す。



Number of nodes: 65,166 Number of elements: 63,648

Element type: 2-D Structural Solid PLANE42 (axisymmetric elelemt)

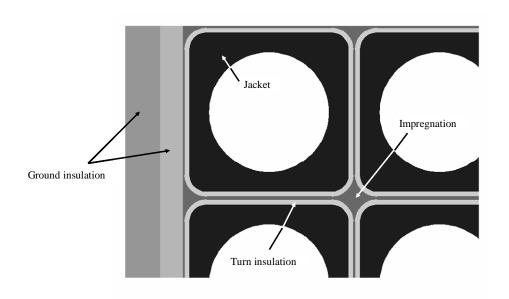


Fig. 4-1 Detail analysis align model (1)

Fig. 4-2 Detail analysis align model (2) (Zooming figure)

4.1.2 物性值

ジャケットの材料は SUS316LN、充填層では Resin+G、ターン絶縁と対地絶縁では VPI-G (G10) を使用する。ターン絶縁と対地絶縁は異方性材料であり、材料方向(積層方向)は厚さ方向である。熱膨張率は瞬間熱膨張率より参照温度を考慮して平均熱膨張率が算出され、解析に使用される。物性値を Table 4-1~Table 4-3 に示す。瞬間熱膨張率は Table 4-3 に示す。ターン絶縁の材料方向(積層方向)を Fig. 4-3 に示す。

Material SUS316LN Resin+G Impregnation Component Jacket Young's modulus (GPa) 205 10 Poisson's ratio 0.28 0.33 Table 4-3 Coefficient thermal $2.4221 \times 10^{-5*}$ expansion (294 K to 4 K) Material properties (3)

Table 4-1 Material properties (1) (SUS316LN, Resin+G)

^{*1 :} Coefficient of the thermal compression 0.7%.

Table 4-2 Material properties (2) (VPI-O (O10))								
Material		VPI-0	G (G10)					
Component		Turn insulation	Ground insulation					
Density (kg/m ³)		2000	2000					
V	E_{x}	12	12					
Young's modulus (GPa)	E _y	20	20					
(61 4)	E_z	20	20					
C1 1-1	G_{xy}	6	6					
Shear modulus (GPa)	G_{yz}	6	6					
(314)	G_{zx}	6	6					
	ν _{xy}	0.33	0.33					
Poisson's ratio	ν yz	0.17	0.17					
	ν_{zx}	0.33	0.33					
Thermal expansion	α_{x}	0.75	0.75					
(%)(293 K to 4 K)	α_{y}	0.25	0.25					
Material direction		Fig. 4-3	X(R)					

Table 4-2 Material properties (2) (VPI-G (G10))

Table 4-3 Material properties (3) (Coefficient of the thermal expansion (instantaneous))

			1 1	. , .						,,
Temp.	4	20	30	40	50	60	70	80	90	100
α	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7
Temp.	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
α	0.8	1.	1.	1.1	1.2	1.2	1.4	1.3	1.4	1.5
Temp.	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300

α	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5452	1.5548	1.4	1.5
Temp.	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
α	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6

Temp. : Temperature (K)

 $\alpha~:$ Coefficient of thermal expansion (instantaneous)($\times\,10^{\text{-5}}\!/\text{K})$

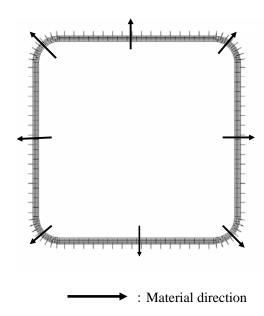
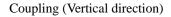
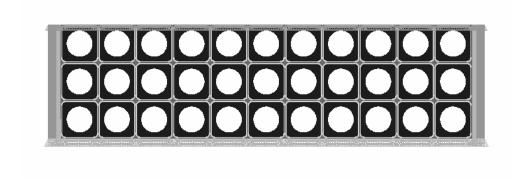


Fig. 4-3 Element coordinate systems of the turn insulation

4.1.3 境界条件

下端のラインの鉛直(上下)方向を拘束し、上端のラインの鉛直方向の変位をカップリングする。境界条件を Fig. 4-4 に示す。





Constraints (Vertical direction)

Fig. 4-4 Boundary conditions (Detail analysis align model)

4.1.4 荷重条件

上端のラインへの圧力、ジャケットの内面に電磁力(ローレンツ力)(Lorentz force)、熱荷重(冷却:4 K)を荷重として与える。「3全体解析」で得られた CS に発生する鉛直方向応力を上端のラインへ圧力として加える。圧力値は最も大きな鉛直方向応力が発生している Case 2 (引力最大)の値とする。この鉛直方向応力は CS2 に発生し、-35.2 MPa である。ローレンツ力の計算には Case 2 において CS2 に発生する磁東密度分布を用いて、ジャケットの内径に Cosine 分布させる。圧力と電磁力の荷重条件を Fig. 4-5 に示す。Table 4-4 に全体解析で得られた鉛直方向応力と本詳細解析で使用する圧力の対応を示す。

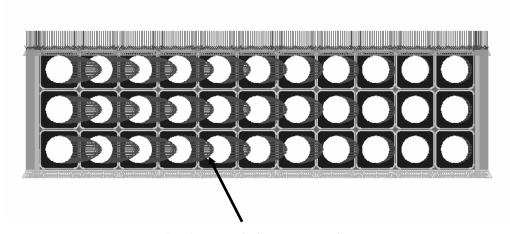
Table 4-4 Correspondence of the analysis conditions and results between the whole analysis and the detail analysis of the align model

		Case	Case 0-2	Case 0-3	Case 2
		Condition	+Gravity	+Cooled	Max. attraction
				down	force
Whole		Constriction	0	0	0
analysis		Gravity	0	0	0
	Load	Cooled down	_	0	0
		Max. attraction force	_		0
	Result	Vertical stress (MPa) *2	-31.813.5	-17.16.6	-35.2 ^{*1} - +1.9
Detail	Load	Pressure (MPa)	24.1	14.4	35.2
analysis					

*1 : Generated in CS2.

*2 : Generated in CS1-CS4.

Pressure



Electric magnetic force (Lorentz force)

Fig. 4-5 Loading conditions (Detail analysis align model)

4.1.5 解析ケース

解析ケースは境界条件と荷重条件の違いによる 4 ケースである。Case 0-2 は圧力、Case 0-3 はさらに熱荷重(冷却: 4K)、Case 2 は Case 0-3 に加えて電磁力を与える。Case 2 に対応した一次荷重を与えた解析を Case 2-0 として行なう。上端のラインに加える圧力は一次荷重に分類する。解析ケースを Table 4-5 に示す。なお、ケース番号と条件は全体解析と対応させている。

Table 4-5 Analysis cases

			Load	
Case	Condition	Pressure (MPa)	Thermal load (K)*1	Max. attraction
				force*1
Case 0-2	+Gravity	24.1	293	_
Case 0-3	+Cooled down	14.4	4	_
Case 2-0	Electric magnetic	35.2	293	0
	force 1 st			
Case 2	Electric magnetic	35.2	4	0
	force			

*1 : Reference temperature : 293 K

*2: "○"; loaded

4.1.6 解析結果

最も大きな応力(トレスカ応力)は Case 2 (引力最大)の2層目最内周のジャケットに発生する。応力値は357 MPa である。締め付け(Case 0-2)により発生した応力は、Case 0-3 では熱収縮により緩和されて低下するが、電磁力の作用(Case 2)により高い応力が発生すると考えられる。各ケースともジャケットの内面の左右に高い応力が発生するが、特に、内側のジャケット内面の左(内側)と外側のそれの左側(外側)に高い応力が見られる。最も大きな応力が発生し、応力評価を行なっている Case 3 の2層目最内周のジャケットとジャケット全体の応力の最小値と最大値を Table 4-6 に示す。ジャケット全体の応力分布を Fig. 4-6~Fig. 4-8 に示す。応力の評価を行なう2層目最内周のジャケットの応力分布を Fig. 4-9 に示す。

Table 4-6 Tresca stress (MPa)

Case	Condition	Whole of the model	Evaluation region
			(2 nd layer, innermost)
Case 0-2	+Gravity	9.3 - 197.1	9.3 - 197.1
Case 0-3	+Cooled down	1.4 - 118.0	18.6 - 108.2
Case 2	Max. attraction	102.2 - 357.3	170.4 - 357.3
	force		

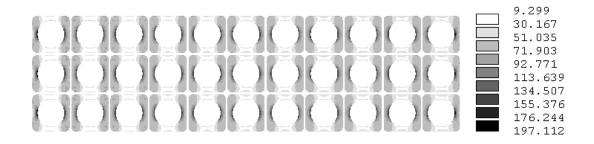


Fig. 4-6 Tresca stress (Case 0-2:+Gravity) (MPa)

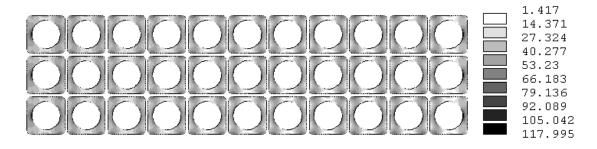


Fig. 4-7 Tresca stress (Case 0-3:+Cooled down) (MPa)

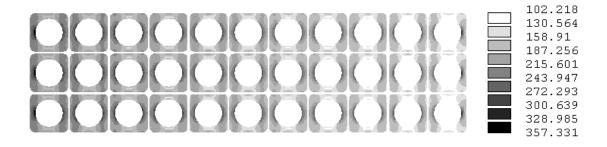
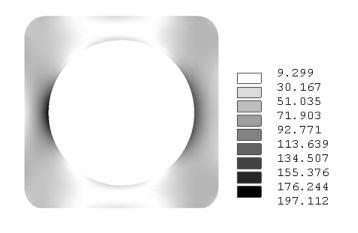
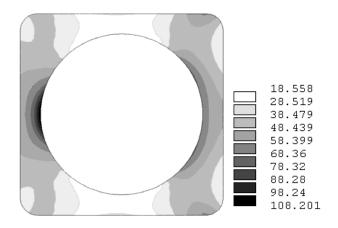


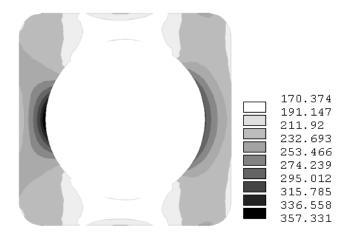
Fig. 4-8 Tresca stress (Case 2 : Max. attraction force) (MPa)



(Case 0-2:+Gravity)



(Case 0-3:+Cooled down)



(Case 2: Max. attraction force)

Fig. 4-9 Tresca stress (2nd layer, innermost) (MPa)

4.1.7 評価

4.1.7.1 応力評価基準

応力評価基準には「3.7.1 応力評価基準」を適用する。

4.1.7.2 ジャケット

ジャケットの応力(トレスカ応力)が最も高く、境界条件の影響が少ない2層最内周に応力評価位置を設定する。4 K(冷却)での一次応力、二次応力やピーク応力を含む応力振幅による設計疲労は材料 FM316LNL の許容値を満たす。293 K(室温)での一次応力も材料 FM316LNL の許容値を満たす。この時は設計疲労の評価を必要としない。全体としては材料 FM316LNM では「マグネット規格」の許容値を満たしている。各ケースの応力分類結果を Table 4-7 に示す。4 K での応力評価結果をTable 4-8 に示す。293 K での応力評価結果をTable 4-9 に示す。応力評価位置をFig. 4-10 に示す。

Membrane Total stress Bending Membrane Peak stress*1 stress*1 Case Condition +Bending stress stress*1 $P_m + P_b$ P_{m} P_b \boldsymbol{F} Case 0-2 +Gravity 99.2 77.7 176.9 20.1 197.0 Case 0-3 +Cooled down 36.8 64.0 100.8 5.3 106.1 Case 2-0 Max. attraction 259.2 106.4 365.6 27.2 392.8 force 1st load Case 2 Max. attraction 273.6 95.8 369.4 25.9 395.3 force

Table 4-7 Stress category (MPa)

^{*1 :} Calculated using the feature of ANSYS.

Table 4-8	Stress evaluati	on (4 K) (FN	M316LNL)	(MPa)
				Î

	Membrane	Membrane	Primary+	Primary+	
	stress	+Bending	Secondary	Secondary	
		stress	Stress	+Peak	
				Stress	
Location			$< P_m + P_b$	$<\!\!P_m\!+\!\!P_b$	Estimation*3
	P_m	P_m+P_b	$+Q>^{*1}$	$+Q+F>^{*1}$	
		Limit of st	ress intensity		
	KS _m	$1.5KS_m$	$3S_m$	$2S_a^{*2}$	
	333	500	1000	893	
line_j	259.2	365.6	268.6	289.2	0

^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

^{*2 :} Strength with respect to repeated peak stress corresponding to the total amplitude for the permissible number of 36,000 repetitions.

*3 : Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNL", Estimation performed at 4 K.

14010 1 7 241000 0 Variation (270 11) (1 1110 1 021 12) (1111 4)				
	Membrane	Membrane		
	stress	+Bending		
		stress		
Location	P_m	$P_m + P_b$	Estimation*2	
	Limit of stress intensity			
	KS _m	$1.5KS_m$		
	140	210		
line_ j	99.2	176.9	0	

Table 4-9 Stress evaluation (293 K) (FM316LNL) (MPa)

^{*2 :} Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNL". Estimation performed at 293 K.

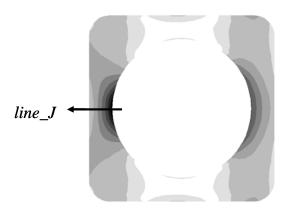


Fig. 4-10 Evaluation line (line_j) (2nd layer, innermost)

4.1.7.3 ターン絶縁の剥離評価

ターン絶縁の剥離評価には材料方向応力 σ_n とせん断応力 τ_n によって定義される Mohr-Coulomb 理論を適用する 6)。 Mohr-Coulomb 理論のうち、LHD(Large Helical Device) criteria 6)では以下の式の値が1を超えると剥離すると判断される。 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) criteria においては σ_n がゼロ以上では以下の式の値が1を超える範囲、ゼロより小さければすべての範囲で剥離すると判断される。

$$(\boldsymbol{\sigma}_{n}/\boldsymbol{\sigma}_{0}) + (\boldsymbol{\tau}_{n}/\boldsymbol{\tau}_{0})^{2} \qquad (*)$$

 σ_n : 引張応力

σ_θ : 引張応力 38 MPa (77 K の値)

 τ_n : せん断応力

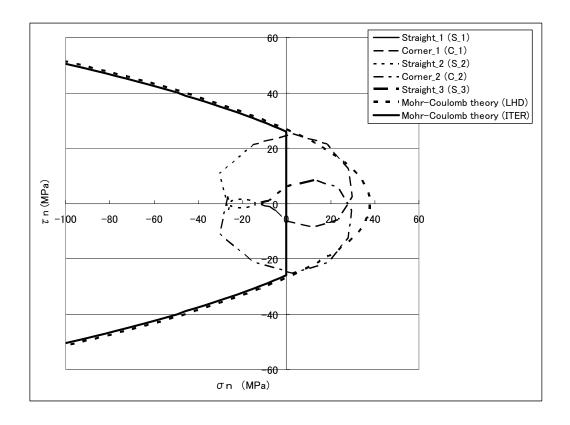
^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

τ₀: せん断応力 27 MPa (77 K の値)

評価を適用する位置はせん断応力が大きく、境界条件の影響が少ない2層目の外から2番目のターン絶縁の内側とする。ここで評価するケースは Case 0-3(+冷却)と Case 2(引力最大)とする。ITER criteria での評価ではコーナー部から直線部分(鉛直部分)で剥離が認められる。Mohr-Coulomb 理論による剥離評価曲線を Fig. 4-11~Fig. 4-12 に示す。Mohr-Coulomb 理論カーブとターン絶縁の位置との関係を Fig. 4-15 に示す。LHD criteria と ITER criteria の剥離の限界もグラフに示す。

ターン絶縁の内側と外側で接触を考慮した解析を試みた。解析ケースは Case 0-3、Case 2 とし、摩擦係数は 0.2 を仮定している。コーナーから直線部分(鉛直部分)に剥離が認められる。接触を考慮した Case 2 の変形図を Fig. 4-13 に示す。ITER criteria による Mohr-Coulomb 理論と接触を考慮した解析との剥離範囲を比較すると、それぞれ Case 0-3 では 33%, 21%、Case 2 では 30%, 20%である。接触を考慮することによる解析の複雑さを考えた場合、Mohr-Coulomb 理論による剥離の評価は有用なものと考えられる。また、機能的には、実験により問題がないことが示されている。なお、グラフでは、コーナー部分が直線部分となるところでは滑らかに変化しない部分もみられるが、要素分割の大きさの影響と考えられ、剥離評価結果には影響を与えない。

ターン絶縁の最大主ひずみの最大値は 0.23%であり、コーナー部の剥離する部分に発生している。最大主ひずみの方向は周方向である。Case 0-2(+自重), Case 0-3, Case 2 のターン絶縁の最大主応力と最大主ひずみの最大値は、それぞれ、21.5 MPa, 17.1 MPa, 27.6 MPa と 0.21%, 0.13%, 0.23%である。Case 2 のターン絶縁の最大主ひずみ分布を Fig. 4-14 に示す。



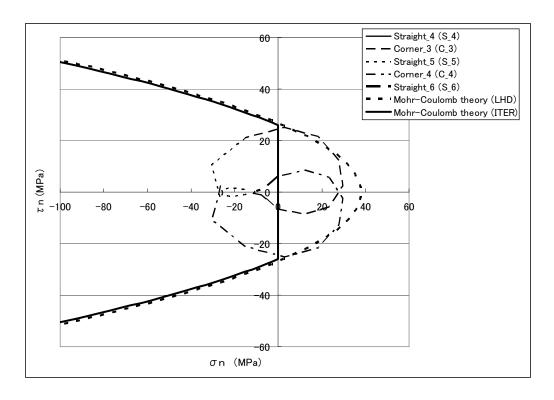
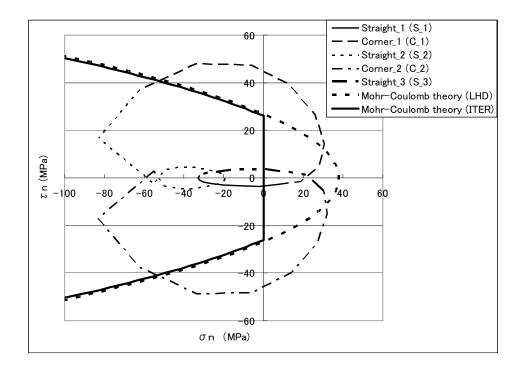


Fig. 4-11 Mohr-Coulomb theory curves (align model: Case 0-3: +Cooled down)



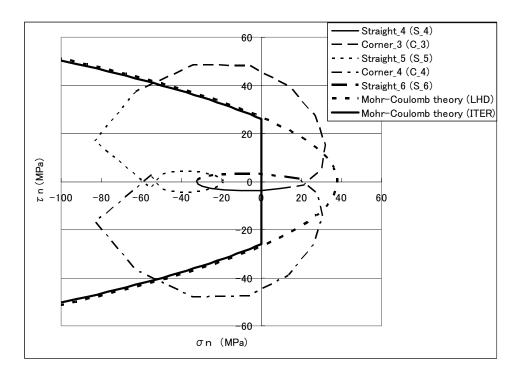


Fig. 4-12 Mohr-Coulomb theory curves (align model : Case 2 : Max. attraction force)

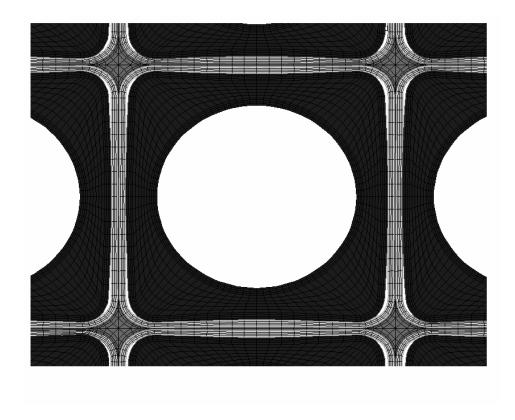


Fig. 4-13 Displacement (align model : Case 2 : Max. attraction force)

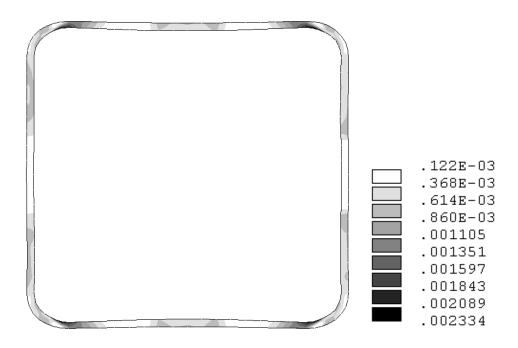
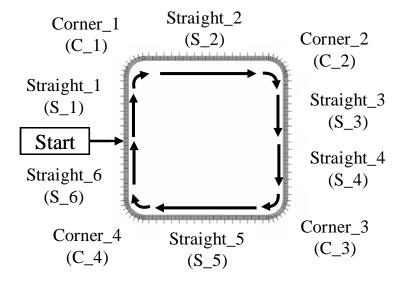


Fig. 4-14 First principal strain (Turn insulation) (align model : Case 2 : Max. attraction force)



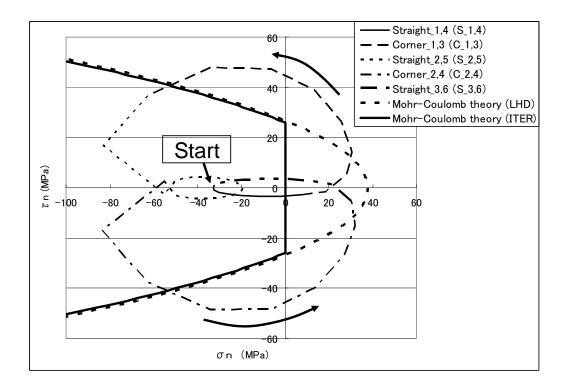
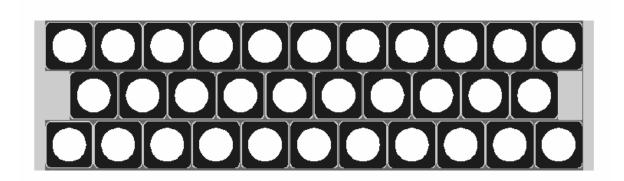


Fig. 4-15 Location of the Mohr-Coulomb theory curves (Turn insulation)

4.2 ジャケット ちどり配置モデル

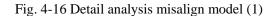
4.2.1 モデル

CS のジャケットのちどり配置モデルの詳細な応力評価を目的とした解析である。解析対象は CS の 3 層分のジャケット、ターン絶縁、対地絶縁とする。軸対称モデルである。ジャケットを ターン絶縁で巻き、充填層で満たし、積層する構造である。内外面は対地絶縁されている。解析モデルを Fig. 4-16 に、拡大図を Fig. 4-17 に示す。



Number of nodes: 30,543 Number of elements: 29,588

Element type: 2-D Structural Solid PLANE42 (axisymmetric element)



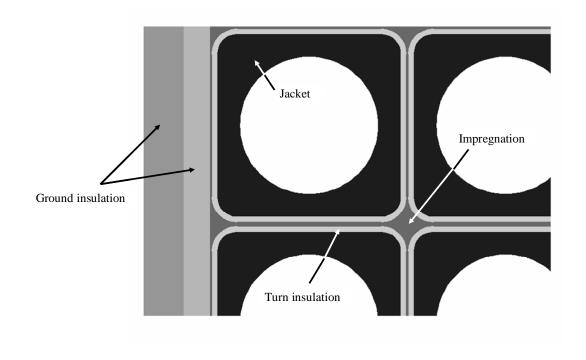


Fig. 4-17 Detail analysis misalign model (2) (Zooming figure)

4.2.2 物性値

物性値は「4.1.2 物性値」と同じとする。

4.2.3 境界条件

下端のラインを鉛直(上下)方向拘束し、上端のラインの鉛直方向に強制変位を与える。正列配置モデルと同様にCS2を対象にした詳細解析である。CSの大部分は正列配置モデルが占め、ちどり配置モデルはわずかである。このため、ちどり配置モデルは正列配置モデルに拘束される。ちどり配置モデルの上端のラインに正列配置モデルの解析結果として得られる変位量を強制変位として与える。強制変位は二次荷重に分類する。ちどり配置モデルの強制変位に対応する正列配置モデルの荷重は、締め付け(+自重を含む)、熱荷重(+冷却)、電磁力であり、Case 2-0として一次荷重による解析も行なう。Table 4-10に正列配置モデルの荷重条件、結果として得られた上端ラインの変位量と本解析(ちどり配置モデル)で使用する強制変位の対応を示す。ケース番号と条件は全体解析、正配置モデルの詳細解析のケース番号に対応している。境界条件をFig. 4-18に示す。

Table 4-10 Correspondence of the analysis conditions and results between the align model and the misalign model

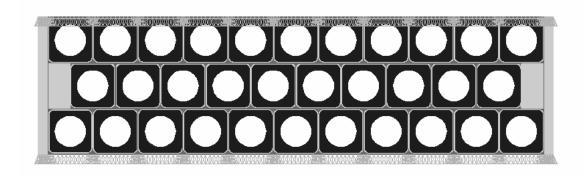
	Case		Case 0-2	Case 0-3	Case 2-0	Case 2
					Max.	Max.
Model		Condition	+Gravity	+Cooled	attraction	attraction
				down	force	force
					1 st load	
		Pressure (MPa)	24.1	14.1	35.2	35.2
Align	Load	Thermal load (K)*1	293	4	293	4
model		Max. attraction force *2*3	_		0	0
	Result	Vertical displacement	-0.053494	-0.32412	-0.090731	-0.39021
	(Top line)	(mm)				
Misalign	Boundary	Prescribed displacement	-0.053494	-0.32412	-0.090731	-0.39021
model	conditions	(Vertical direction)				
	(Top line)	(mm)				

*1 : Reference Temperature

*2 : Electric magnetic force(Lorentz force)

*3: "O"; loaded

Prescribed displacement (Vertical direction)

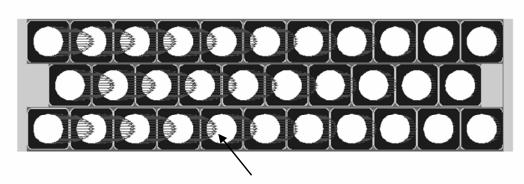


Constraints (Vertical direction)

Fig. 4-18 Boundary conditions (Detail analysis misalign model)

4.2.4 荷重条件

荷重として、熱荷重(冷却:4K)、電磁力(ローレンツ力)(Lorentz force)、を与える。「3全体解析」の Case 2(引力最大)に対応した解析であり、正列配置モデルと同様にローレンツ力の計算には電磁力解析の Case 2(引力最大)において CS2 に発生する磁束密度分布を使用して、ジャケットの内径に Cosine 分布で与える。なお、電磁力は一次荷重、熱荷重は二次荷重条に分類する。電磁力を Fig. 4-19 に示す。



Electric magnetic force (Lorentz force)

Fig. 4-19 Loading conditions (Detail analysis misalign model)

4.2.5 解析ケース

解析ケースは境界条件と荷重条件の違いによる 4 ケースである。Case 0-2 は締め付け(+自重)に対応した強制変位、Case 0-3 はさらに熱荷重(冷却)、Case 2 は Case 0-3 に加えて電磁力を与える。Case 2 に対応した一次荷重を与えた解析を Case 2-0 として行なう。上端のラインに加える強制変位は二次荷重に分類するが、Case 2-0 は正配置モデルとの対応で一次荷重とする。解析ケースと荷重の組み合わせを Table 4-11 に示す。

Table 4-11 Analysis cases

		Load		
Case	Condition	Prescribed displacement	Thermal load	Max. attraction
		(Vertical direction)	$(K)^{*1}$	force *2*3
		(mm)		
Case 0-2	+Gravity	-0.053494	293	_
Case 0-3	+Cooled down	-0.32412	4	_
Case 2-	Max. attraction	-0.090731	293	0
	force 1 st load			
Case 2	Max. attraction	-0.39021	4	0
	force			

*1 : Reference temperature : 293 K,

*2 : Electric magnetic force(Lorentz force)

*3: "○"; loaded

4.2.6 解析結果

ジャケット全体の応力(トレスカ応力)は各ケースとも内側と外側に高い部分が見られる。 最大応力(トレスカ応力)は Case 2(引力最大)の1層最内側に発生し、355 MPa である。Case 2 において各ジャケットで高い応力が発生している部分は主に内周の左右である。Case 0-2(+ 自重)、Case 0-3(+冷却)の最大応力は、Case 2 と比較すると 2 分の 1 以下である。応力の評価部分は、最大応力(Case 3)が発生している 1 層最内側と他のケースも含め高い応力が見られる 2 層最内側、3 層最外側のジャケットとする。ジャケット全体と応力評価部分の最大応力を Table 4-12 に示す。各ケースの全体の応力分布(トレスカ応力)を Fig. 4-20~Fig. 4-22 に示す。応力評価部分の応力分布を Fig. 4-23~Fig. 4-25 に示す。応力評価で置を Fig. 4-26 に示す。

Table 4-12 Tresca stress (MPa)

			Evaluation region		
Case	Condition	Whole of	Region K	Region L	Region M
		the model	2 nd layer,	1 st layer,	3 rd layer,
			innermost	innermost	outermost
Case 0-2	+Gravity	-190.2	-190.2	-165.6	-160.5
Case 0-3	+Cooled down	-119.8	-80.3	-119.6	-119.8
Case 2-0	Max. attraction	-159.5	-154.5	-159.5	-92.0
	force 1 st load				
Case 2	Max. attraction	-355.2	-321.6	-355.2	-302.7
	force				

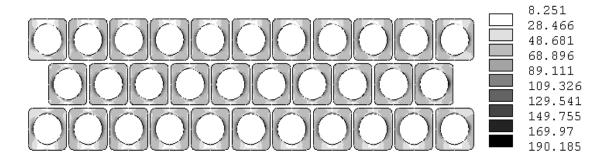


Fig. 4-20 Tresca stress (Case 0-2: + Gravity) (MPa)

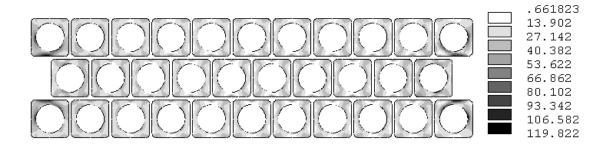


Fig. 4-21 Tresca stress (Case 0-3:+Cooled down) (MPa)

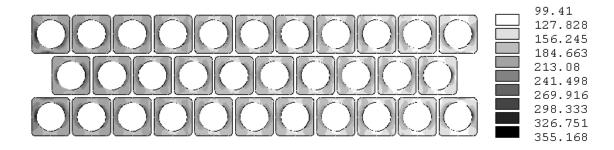


Fig. 4-22 Tresca stress (Case 2: Max. attraction force) (MPa)

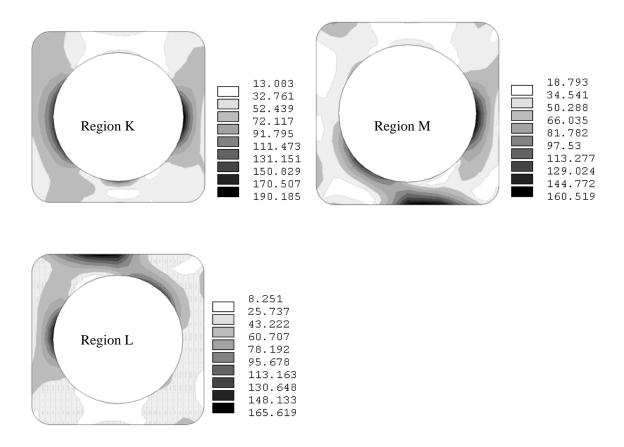


Fig. 4-23 Tresca stress (Evaluation region) (Case 0-2:+Gravity) (MPa)

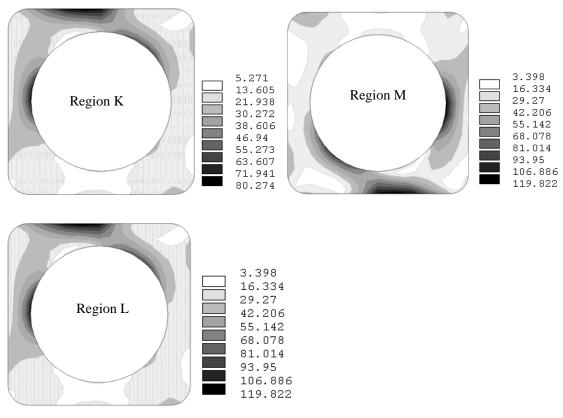


Fig. 4-24 Tresca stress (Evaluation region) (Case 0-3: + Cooled down) (MPa)

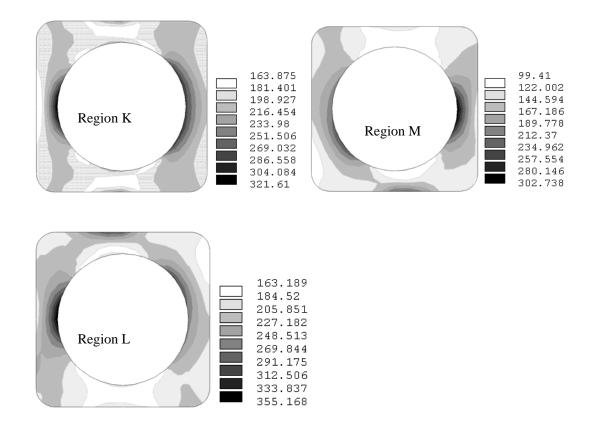


Fig. 4-25 Tresca stress (Evaluation region) (Case 2 : Max. attraction force) (MPa)

4.2.7 評価

4.2.7.1 応力評価基準

応力評価基準には「3.7.1 応力評価基準」を適用する。

4.2.7.2 ジャケットの応力評価

最も高い応力が発生している 1 層最内側(Case 2)と他のケースも含め高い応力が見られる 2 層最内側、 3 層最外側にジャケットの応力評価位置を設定する。一次応力は材料 FM316LNL の許容値を満たす。一次応力と二次応力やピーク応力を含む応力振幅も材料 FM316LNL の設計疲労の許容値を満たす。いずれも応力評価結果は評価基準「マグネット規格」の許容値を満たす。応力評価位置を Fig. 4-26 に示す。各ケースの応力分類結果を Table 4-13 に示す。Case 0-3 (+冷却)での応力評価結果を Table 4-14 に示す。

Table 4-13 Stress category (MPa)*1

			Membrane	Bending	Membrane	Peak	Total
Case	Condition	Location	stress	stress	+Bending	stress	stress
					stress*1		
			P_m	P_b	$P_m + P_b$	F	
		line_k	97.6	74.8	172.4	17.8	190.2
Case 0-2	+Gravity	line_l	80.2	69.2	149.4	16.5	165.9
		line_m	78.6	66.1	144.7	16.1	160.8
		line_k	10.8	41.7	52.5	5.9	58.4
Case 0-3	+Cooled down	line_l	51.9	43.4	95.3	11.0	106.3
		line_m	54.4	48.4	102.8	11.9	114.7
	Max. attraction	line_k	147.4	0.7	148.1	2.0	150.1
Case 2-0	force1st load	line_l	149.7	0.0	149.7	1.0	150.7
		line_m	88.8	2.7	91.5	0.8	92.3
	Max. attraction	line_k	221.6	87.1	308.7	21.6	330.3
Case 2	force	line_l	260.1	79.7	339.8	26.5	366.3
		line_m	201.0	85.1	286.1	28.7	314.8

^{*1 :} Calculated using the feature of ANSYS.

Table 4-14 Stress evaluation (4 K) (FM316LNL) (MPa)

	Membrane	Membrane	Primary+	Primary+	
	stress	+Bending	Secondary	Secondary	
		stress	Stress	+Peak	
Location				Stress	Estimation*3
			$< P_m + P_b$	$< P_m + P_b$	
	P_m	P_m+P_b	+ Q >*1	$+Q+F>^{*1}$	
	Limit of stress		ress intensity		
	KS _m	$1.5KS_m$	$3S_m$	$2S_a^{*2}$	
	333	500	1000	893	
line_k	147.4	148.1	256.2	271.9	0
line_l	149.7	149.7	244.5	260.0	0
line_m	88.8	91.5	183.3	200.1	0

^{*1 : &}lt;>indicates the range for the strength with respect to repeated stress.

^{*2 :} Strength with respect to repeated peak stress corresponding to the total amplitude for the permissible number of 36,000 repetitions.

^{*3 :} Depends on "FM-3221 general". "O"indicates that the permissible values are met for "FM316LNL". Estimation performed at 4K.

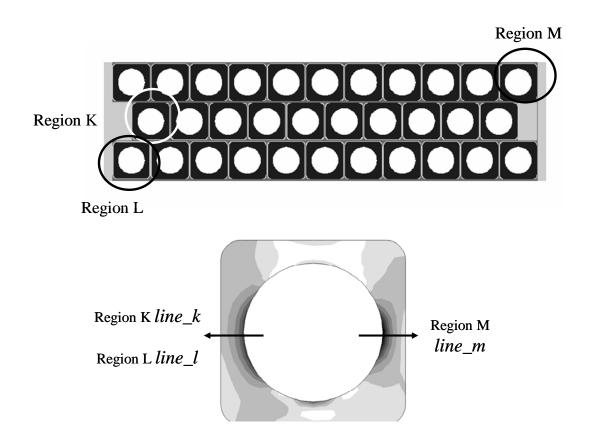
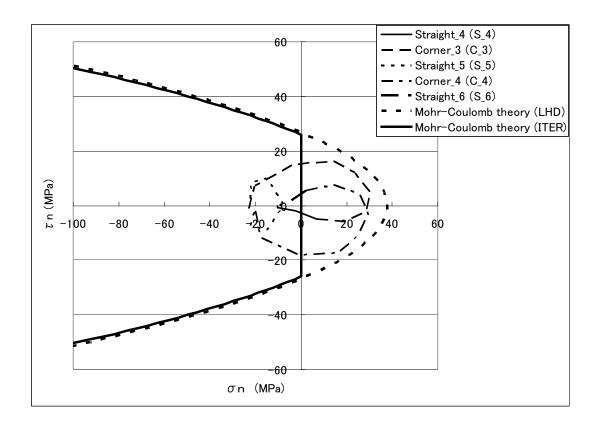


Fig. 4-26 Evaluation regions and lines of the misalign model

4.2.7.3 ターン絶縁の剥離評価

ターン絶縁の剥離評価には正列配置モデルと同様に Mohr-Coulomb 理論を適用する 6)。剥離評価はせん断応力が大きく、境界条件の影響を少ない 2 層目の外から 2 番目のターン絶縁の内側を選択する。ここで評価するケースは Case 0-3 (+冷却) と Case 2 (引力最大) とする。ITER criteria での評価ではコーナー部から直線部分(鉛直部分)で剥離が認められる。正列配置モデルの結果も考慮して剥離評価をする必要がある。

実際には、実験により機能的には問題がないことが示されている。なお、コーナー部分が直線部分となるところでは滑らかに変化しない部分もみられるが、要素分割の大きさの影響と考えられ、剥離評価結果には影響を与えていない。Mohr-Coulomb 理論による剥離評価曲線を各ケースにつついて Fig. 4-27~Fig. 4-28 に示す。LHD criteria と ITER criteria の剥離の限界もグラフに示す。カーブとターン絶縁の位置との関係を Fig. 4-15 に示す。



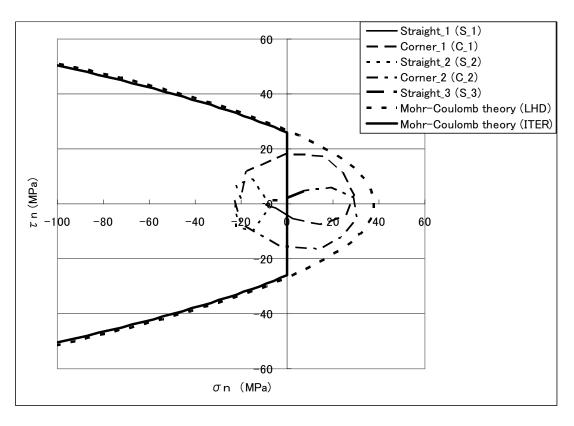
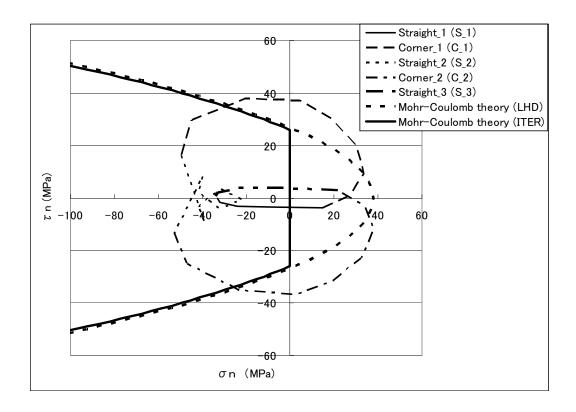


Fig. 4-27 Mohr-Coulomb theory curves (misalign model : Case 0-3: + Cooled down)



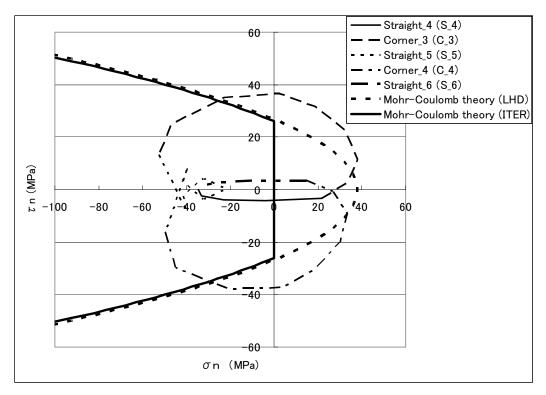


Fig. 4-28 Mohr-Coulomb theory curves (misalign model : Case 2 : Max. attraction force)

5 結論

日本と EU との共同プロジュクトであるサテライトトカマク(JT-60SA:JT-60 Super Advanced)の CS、支持構造物とジャケットの構造設計の解析と評価を行なった。

電磁力解析により CS に働く電磁力を求めた。解析ケースは各コイルとプラズマに流される電流の違いにより、反発力最大、引力最大、初期励磁、非平衡上最大、非平衡下最大の5ケースである。電磁力解析により得られた電磁力を用いて室温と冷却状態での CS と支持構造物全体の構造解析を行なった。支持構造物は強度と疲労評価の両者ともに「核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格(マグネット規格)」を満たした。また、室温と冷却状態で CS 間と上下は隙間が開かないようにする必要があり、タイ・プレートにより締め付けがこの役割を担っているが、CS 間と上下の圧縮を確保し、かつタイ・プレートが「マグネット規格」を満たすことができる構造を得ることができた。全体の構造解析の結果を元に正配置モデルとちどり配置モデルのジャケットの詳細解析を行なった。この詳細解析においても「マグネット規格」を満たしていることを検証した。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、トカマクシステム技術開発ユニットをはじめ、JT-60SAの開発にたずさわっている方々に敬意を評するとともに、ご意見、援助をいただきました関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)吉田清, 土屋勝彦, 木津要, 村上陽之, 星亮, 米田昌生, 松川誠: "JT-60SA 用超伝導導体の製作とポロイダル磁場コイルの最適化", 第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学会 講演予稿集, 19(2008)
- 2)K.Tsuchiya, Y.Suzuki, K.Kizu, K.Yoshida, H.Tamai, M.Matsukawa, N.Dolgetta, C.Portafaix, L.Zani and A.Pizzuto: "Mechanical Design of JT-60SA Magnet System", IEEE Trans. Appl. Super., 18, pp.208-211(2008)
- 3)K.Yoshida, K.Kizu, K.Tsuchiya, H.Tamai, M.Matsukawa, M.Kikuchi, A.della Corte, L.Muzzi, S.Turtu, A.Di.Zenobio, A.Pizzuto, C.Portafaix, S.Nicollet, B.Lacroix, P.Decool, J-L.Duchateau and L.Zani: "Conceptual Design of Superconducting Magnet System for JT-60SA", IEEE Trans. Appl. Super., 18, pp.441-446(2008)
- 4)土屋勝彦, 木津要, 村上陽之, 淺川修二, 倉持勝也, 吉田清, 松川誠: "JT-60SA 用中心ソレノイドの支持構造設計", 第79回 2008 年度秋季低温工学・超電導学会 講演予稿集, 20(2008)
- 5)社団法人 日本機械学会:"核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格 (2008 年度版)",社 団法人 日本機械学会,(2008)
- 6)K.Kitamura, T.Yamamoto, T.Uchida, H.Moriyama, J.Yamamoto, A.Nishimura, O.Motojima: "CRYOGENIC SHEAR FRACTURE TESTS OF INTERLAMINAR ORGANIC INSULATION FOR A FORCED-FLOW SUPERCONDUCTING COIL", IEEE Trans. Magnetics, 30, pp. 1879-1882(1994)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	单位
- 本半里	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 量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
和工工里	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体 積	立法メートル	m ³
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	$\mathbf{m}^{\cdot 1}$
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質 量 濃 度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(6)	(((() () () () () () () () (1
比 透 磁 率 (b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。 (b) これらは無灰元量あるいは灰元1 ともっ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3 因有の名称と記号で表されるCI組立単位

表3.	固有の名称と記え	デじ衣さ		
			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	記万	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 (b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$\mathbf{sr}^{(c)}$	1 (b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	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	${ m m}^{\cdot 1} { m kg \ s}^{\cdot 2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	$\mathrm{m}^2\mathrm{kg}\mathrm{s}^{-2}$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \text{ kg s}^{\cdot 3}$
電 荷 , 電 気 量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{\cdot 2} kg^{\cdot 1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	$m^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{\cdot 2} kg^{\cdot 1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$
	テスラ	Т	Wb/m^2	${ m kg\ s}^{2}{ m A}^{1}$
	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光 束	ルーメン	lm	$\mathrm{cd}\;\mathrm{sr}^{\mathrm{(c)}}$	cd
	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{\cdot 2}$ cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		cd m ⁻² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
カーマ	7 4 1	l ^{Gy}	5/Kg	m s
線量当量, 周辺線量当量, 方向	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$\mathrm{m}^2\mathrm{s}^{\cdot2}$
性線量当量,個人線量当量	V - 4 - 7 - 1	SV	5/Kg	
酸 素 活 性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔差表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性接種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	Lieble Asset Michigan Company		TC-> D1
	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘 度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 \text{ kg s}^{\cdot 2}$
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{·3}
熱容量、エントロピー		J/K	$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
比熱容量,比エントロピー		J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
		W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強き	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m ⁻³ sA
	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モ ル エ ネ ル ギ ー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X 線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{\cdot 1}sA$
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨ タ	Y	10 ⁻¹	デ シ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10.15	フェムト	f

 $10^{\cdot 18}$ $10^{\cdot 21}$

ゼプ

 10^3

 10^2

 10^1

表 5.SI 接頭語

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

h

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	٥	1°=(п/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad
秒	,,	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, 1	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. \mathbf{SI} に属さないが、 \mathbf{SI} と併用される単位で、 \mathbf{SI} 単位で

衣される数値が美験的に待られるもの						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg				
統一原子質量単位	u	1u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	_	レ	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
				1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	ーム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	M	1 M=1852m
バ	_	ン	b	$1 b=100 fm^2=(10^{-12} cm)2=10^{-28} m^2$
1	ッ	卜	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	_	パ	Np ~	CI単位しの数は的お即反け
ベ		ル	В	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB ~	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{cd cm}^{-2} = 10^4 \text{cd m}^{-2}$
フ ォ ト	ph	$1 \text{ ph}=1 \text{cd sr cm}^{-2} 10^4 \text{lx}$
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe • (10 ³ /4π)A m ^{·1}

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ' 」 は対応関係を示すものである。

長10.	SIに属	さない	いその他	の単	位の例

衣10. SIに属さないての他の単位の例						
名称 記					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		ン		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10-9 \text{T}$
フ	工		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系.	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
1				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	¤		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
ર	ク		口	ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$