

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：63902
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2016～2019
 課題番号：16K06943
 研究課題名(和文) すべりと接触を考慮したマルチスケール解析による核融合炉用マグネットの構造最適化

研究課題名(英文) Multiscale structural analysis considering a slip and contact element for a superconducting magnet in a fusion reactor

研究代表者
 田村 仁 (Tamura, Hitoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：20236756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉用超伝導マグネットには、強大な電磁力が作用し、超伝導コイルは厚肉の構造物によって支持され、許容応力、変形以下となるように設計される。しかしながら、構造の巨視的な応力が許容以下であっても超伝導体や絶縁物に局所的な大きな負荷が作用している可能性がある。そこで、すべりと接触を考慮したマルチスケール解析を核融合炉用超伝導マグネットへ適用し、均質化解析・全体解析・局所化解析という一連のマルチスケール解析により核融合炉構造の最適化に関する有効性を明らかにした。また、本研究でまとめ解析手順により、構造パラメータの異なる核融合炉超伝導マグネットシステムの健全性評価が体系的に行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで核融合炉の構造健全性評価は、構造材料や超伝導素線等個々の要素研究と構造全体の設計研究がそれぞれ独自の評価方法で行われ、それぞれの最も厳しい条件等を互いにやりとりして進められてきた。本研究で提案するマルチスケール解析を拡張した手法は、核融合炉構造物の機械的挙動を超伝導素線レベルの挙動から全体構造の健全性までを一貫して行うものであり、現在及び今後進められる核融合炉用超伝導マグネットシステムを最適化していく上で、スピードアップと装置の信頼性を高めるという観点から非常に有用である。

研究成果の概要(英文)：A strong electromagnetic force acts on the superconducting magnet for a fusion reactor. The superconducting coil is supported by a thick structure which is designed to have enough rigidity. However, even if the overall stress in the support structure is below the allowable level, there is a possibility that a local load acts on the superconducting conductor or the insulator in the coil. We applied multi-scale analysis considering slip and contact to superconducting magnets for fusion reactors by carrying out a series of multi-scale analyses such as homogenization analysis, overall analysis, and localization analysis, which were effective for optimization of the fusion reactor structure. In addition, it was shown that systematic evaluation of the integrity of the superconducting magnet system in the fusion reactor with different structural parameters can be performed systematically by the analytic procedure conducted in this research.

研究分野：核融合学

キーワード：マルチスケール 超伝導マグネット 有限要素法 ヘリカル型核融合炉 健全性評価 応力ひずみ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉では、最適な閉じ込め磁場の形成と増殖/遮蔽ブランケットの設置空間確保のために、プラズマ実験装置や熱核融合実験炉に比べてより大型の装置が必要となる。例えば、図1のような核融合発電実証炉では、装置全体の最大半径がおよそ25メートル、高さは20メートルと見込まれている。超伝導マグネットによる最大磁場はコイル直近で発生し、その値はおよそ13 Tである。この強大な磁場と超伝導体に流れる100 kA級の大電流との相互作用により、超伝導マグネットには最大で1メートルあたり6000トンという強大なローレンツ電磁力が作用する。この電磁力はコイルを囲む厚肉のコイル支持構造物によって支持され、許容応力、変形以下となるように支持構造物が設計される。しかしながら、複合則等で算出された物性値を用いた構造解析の結果、全体が許容応力以下であったとしても、超伝導マグネットの内部では、構成部材である超伝導体や絶縁物に局所的な負荷が作用している可能性があり、その負荷によって超伝導性能が損なわれることは非常に重要な問題となる。従って、装置の健全性評価の際には、全体構造はもちろん、構成材料の局所的な挙動に関しても細心の注意を払う必要がある。

一方、構造物の健全性評価には有限要素法による解析が核融合研究においても盛んに用いられているが、全体構造と構成要素の規模や性質が大きく異なる場合、それらを単一のモデルとして扱うことは容易ではない。核融合炉は全体の大きさが十メートルオーダーであるのに対し、使用する超伝導体は数十ミリメートル、さらにその超伝導体は直径または厚さが1ミリメートル以下の超伝導素線やテープ状超伝導線材を何本も束ねた構造である。このような場合、最小の構造規模に合わせた一つの解析モデルによって評価するには要素分割数が膨大となり現実的ではない。そのための解析方法のひとつとして、マルチスケールによる手法が提唱されているが、複雑でスケール範囲が大きい核融合炉のマグネットシステムに適用し、その具体的な解析方法と結果をまとめた例はなかった。また、【超伝導素線と構成部材】または【超伝導体と絶縁物】では通常の複合材料とは異なる挙動、すなわち構成部材間のすべり、接触、部分的な損傷が発生することが想定され、これらを考慮した評価を行わなければならない。

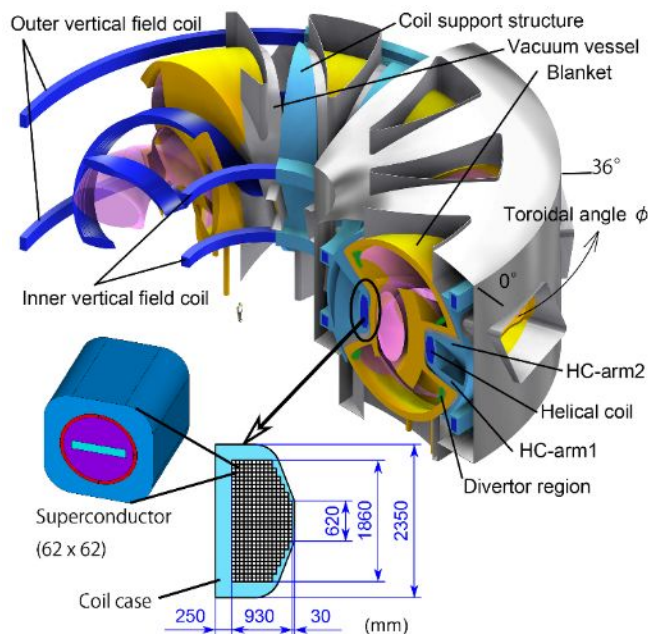


図1 核融合炉の構造と構成要素のスケール比較

2. 研究の目的

本研究では、核融合炉用超伝導マグネットシステムにすべりと接触を考慮したマルチスケール解析を適用し、その有効性を明らかにする。マルチスケール解析では、マイクロ部分を等価的な物性値をもつ単一要素として置き換える「均質化」解析を行い、次にここで得られた「均質化物性値」を全体構造に適用して解析を行い、その結果得られた要素ひずみ分布をマイクロ構造にフィードバックして、個々のマイクロ要素の機械的挙動を詳細に評価する。これを超伝導マグネットシステムに適用し、全体構造から構成要素までの機械的挙動を評価し、構造物としての健全性のみならず、超伝導性能の劣化が起きないように支持構造の具体的な評価を行う。これらにより核融合炉用超伝導マグネットの設計に必要なマルチスケールによる解析手法および構造設計指針をまとめることを目的とする。

3. 研究の方法

汎用有限要素法解析プログラムを基本的なツールとし、すべりや接触が発生すると考えられる部分に非線形要素による拡張を行い、対象となる核融合炉用超伝導マグネットシステムをモデル化する。想定される荷重条件として、超伝導マグネットを励磁した際の電磁力を用い、マイクロ・マクロ双方の見地から健全性評価と構造最適化を行う。まず、マルチスケールのマイクロ側の繰り返し構造となっている要素単位の物性値を得るための均質化解析を行った。超伝導体は導体の長手方向(巻き線方向)に対する断面形状は常に同一であることから、このようなマルチスケール均質化解析の対象とすることができる。均質化解析では、ユニット要素を等価的な3次元方向の異方性を持つ合計9つとなる縦弾性係数、せん断係数、およびポアソン比を得る。現在候補となっている超伝導体は、素線種類や冷却方法の違いにより様々な形状や特徴を持っており、超伝導素線、安定化材、絶縁物、およびジャケット構造材等がそれぞれの特性に合わせて配置された断面構造となる。均質化解析の結果、ユニット要素の形状や構成する材料により均質化物性値にどのような違いが出るのかを検証する。

次に、全体の構造モデルへ均質化物性値をモデルの超伝導体部分に適用した詳細な応力解

析を行う。このとき超伝導マグネットの機械的挙動としてすべりや接触が発生しうる部分に非線形の接触要素をマルチスケール解析とともに適用し、より実際の挙動を模擬できるようにモデル化して解析を行う。最後に、マクロ側の全体解析で得られた結果をミクロ側へ要素ひずみによる境界条件としてフィードバックし、ミクロ側の構成要素一つ一つの挙動を解析する。構成要素の応力や変位が想定している許容値内であるかを詳細に調べ、許容範囲を超えている場合にはより健全な構造となるように全体の見直しを行う。これらを繰り返すことで構造の最適化を進めていく。一連の解析の流れを図2に示す。以上の解析の結果をもとに、マルチスケール解析手法を用いた核融合炉用超伝導マグネットシステムにおける構造最適化と超伝導導体内部の詳細な挙動の評価を行い、解析・評価方法についてまとめる。

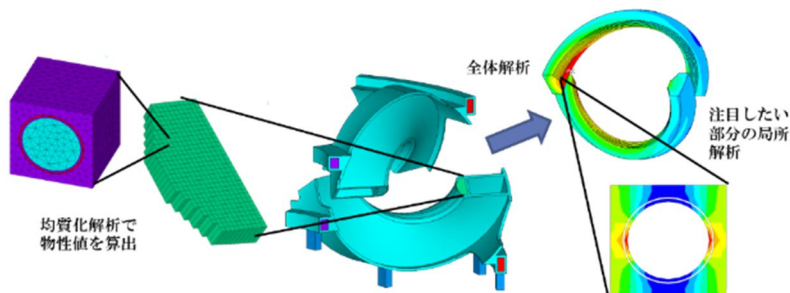


図2 核融合炉超伝導マグネットに対するマルチスケール解析手順

4. 研究成果

解析の対象として、概念設計が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR を選んだ。その理由は、ヘリカル型はマグネットシステムの機械的な構造が複雑であり、単純な0次元～2次元の解析では健全性が評価できないこと、および超伝導導体の候補として3種類が提案されており、それぞれの超伝導導体の使用によって機械的挙動にどのような違いがあるのかを知ることは工学的に非常に重要な課題であるためである。ヘリカル型核融合炉にはプラズマ物理や核融合工学の観点からいくつかのタイプが提案されているが、本研究では最も全体スケールの大きいFFHR-d1とマグネットシステムに作用する電磁力が最も大きくなるFFHR-c1の二つを採用した。これらのヘリカル型核融合炉に対してマルチスケール解析を行い、その挙動を明らかにした。

(1) 超伝導導体の均質化解析

FFHR-d1の超伝導マグネットは、ガス冷却高温超伝導型、ケーブルインコンジット低温超伝導型、および間接冷却低温超伝導型の3つが候補として提案されている。それぞれで用いられる超伝導導体は構成材料や断面形状が異なるため、機械的な特性もそれぞれ異なる。図3に各方式の超伝導導体の概略図を示す。このうち gas-cooled HTS と CICC LTS は62 mm 角を想定した設計を元にしてしている。一方、direct-cooled LTS はこれらとは異なるコイル断面形状が提案されているが、他の導体との比較のために、導体内部の材料比率は一定にした同じ62 mm 角の導体形状を仮定して解析モデルとした。これらをモデル化して求められた均質化物性値を表1に示す。この表より、巻線方向の剛性は gas-cooled HTS が最も高く、indirect-cooled LTS が低いことがわかる。一方、巻線に垂直な方向の剛性は gas-cooled HTS が低いことがわかった。また、せん断係数やポアソン比は単純な複合則で求めることはできず、マルチスケール均質化解析によって今後の解析・評価に欠かすことのできないパラメータを得ることに成功した。

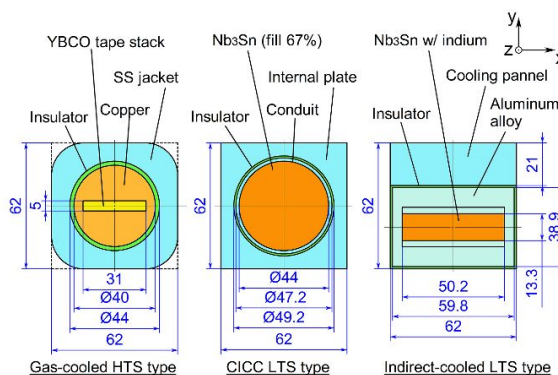


図3 超伝導導体の断面図。左: gas-cooled HTS (ガス冷却高温超伝導型) 中: CICC LTS (ケーブルインコンジット低温超伝導型) 右: indirect-cooled LTS (間接冷却低温超伝導型)

(2) 全体構造解析

超伝導コイルは図1に示したように超伝導導体を巻き線し、その周囲をコイル支持構造物という厚板のステンレス構造物に囲まれた構造である。全体構造解析では、超伝導コイル巻き線部の物性値として(1)の均質化解析で得られた値を有限要素の物性値として与える。ここで、巻き線方向が超伝導導体の長手方向、コイルの高さ方向が超伝導導体の高さ方向と一致させた要素特性とすることでコイル内の正確な導体寸法を正確にとる必要はなく、要素分割の肥大化を押し返ることが可能となる。このようにして得られた結果の例として、超伝導導体として gas-cooled HTS

表1 候補超伝導導体の均質化物性値

	Gas-cooled HTS	CICC LTS	Indirect-cooled LTS
E_x (GPa)	79.6	121.3	114.0
E_y (GPa)	79.4	121.3	103.1
E_z (GPa)	156.1	144.9	114.0
G_{xy} (GPa)	44.6	39.8	37.4
G_{yz} (GPa)	43.9	47.7	37.5
G_{xz} (GPa)	44.0	47.7	43.6
ν_{xy}	0.394	0.279	0.314
ν_{yz}	0.149	0.244	0.283
ν_{xz}	0.150	0.244	0.308

を採用した場合のミーゼス応力分布図を図4に示す。図中には最大変位の発生個所と大きさを示している。超伝導導体の違いにより支持構造物の応力、変位にどのような差が生じるかを表2。ミーゼス応力は gas-cooled HTS が最も低い値を示し、indirect-cooled LTS が最も高い。この結果は導体単独での巻線方向のヤング率が全体構造の挙動に大きく寄与していることを示唆している。最大変形量に関しては大きな差はない。コイルの巻線方向に生じるひずみについても巻線方向のヤング率が gas-cooled HTS が最も低い結果となっている。しかしながら導体断面の横方向のヤング率が相対的に低いため、gas-cooled HTS がコイル断面のせん断応力が他の方式よりも高い結果となっている。

(3) 局所解析

全体解析で得られた超伝導導体部分に生じたひずみ量を均質化解析で用いたモデルに与えることで、超伝導導体に生じる応力分布を詳細に評価することができる。コイル巻き線部の詳細な挙動を知るために、巻き線部部分のみを取り出し、面内せん断応力の分布を示したのが図5である。この中で特に応力が厳しい部分であるヘリカルコイル外側赤道部付近に注目した。最大値となっている要素に働いている6方向のひずみ分布を均質化解析でモデル化したユニット要素に与えることで要素内の詳細な応力・ひずみ分布について局所化解析を行った。その結果を図6に示す。図中のせん断応力は直交座標系で示したもので、周辺のジャケット部に大きなせん断応力が発生することがわかる。さらに、絶縁物に作用するせん断応力は導体挙動に大きく影響するため、gas-cooled HTS および indirect-cooled LTS での導体内部の絶縁物に作用する応力を解析し、絶縁物の強度基準に従って評価した。この候補導体の場合、絶縁物は断面内で円形に設置されており、使用している繊維強化プラスチックの積層方向と繊維強化方向をそれぞれ円筒座標の半径方向と周方向に一致させて応力値を変換している。図7は gas-cooled HTS の場合の絶縁物に作用する厚さ方向の垂直応力と層間のずれに相当するせん断応力の分布を示している。同様に indirect-cooled LTS についても詳細に評価した結果、いずれの方式も引張応力とせん断応力が同時に作用する場合を許容する基準では健全であるが、圧縮応力下でのみ、せん断応力を許容する基準では健全な範囲に入っていない結果となった。このような絶縁物の健全性評価は実際に使用する材料での実験的評価を必要とするため、今後設計を進める上で検討が必要であることが明らかとなった。

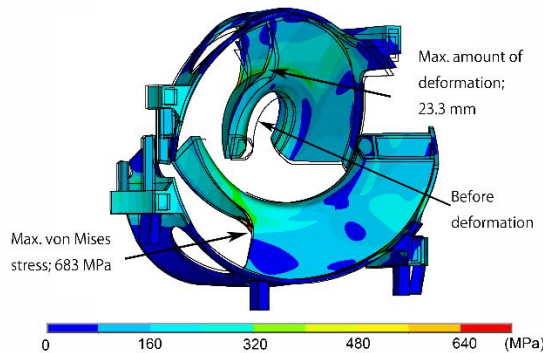


図4 gas-cooled HTS を使用した場合のコイル支持構造物に作用するミーゼス応力分布

表2 候補導体による機械的挙動の違い

	Gas-cooled HTS	CICC LTS	Indirect-cooled LTS
Von Mises stress (MPa)	683	691	720
Amount of deformation (mm)	23.3	23.6	24.9
Axial strain in HC (%)	0.183	0.188	0.207
Shear strain in HC (MPa)	34	31	31

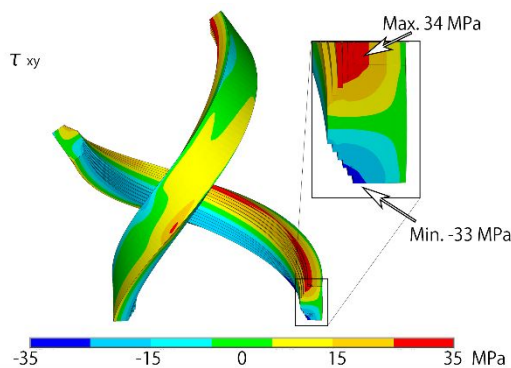


図5 gas-cooled HTS を使用した場合のコイル支持構造物に作用するミーゼス応力分布

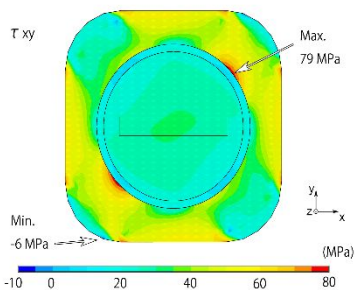


図6 ヘリカルコイル外側赤道部分の gas-cooled HTS 導体内に働く面内せん断応力分布図

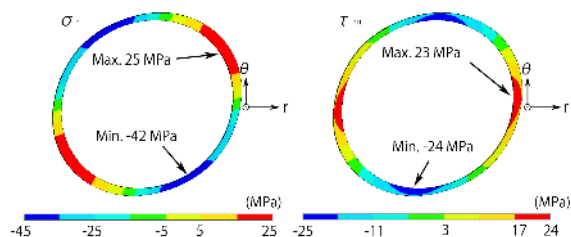


図7 gas-cooled HTS を絶縁物に作用する厚さ方向の垂直応力と層間のずれに相当するせん断応力の分布

(4) すべりと接触の影響

超伝導コイル部とコイルケース間には、すべりや接触等が発生すると予想されるため、その部分の非線形挙動を考慮したモデル化を行った。モデル化の対象は、いくつかのヘリカル型核融合炉の概念設計の中で最も電磁力が高くなる FFHR-c1 とした。FFHR-c1 は FFHR-d1 の 0.7 倍の大きさの相似形でプラズマ中心での磁場が 3.7T から 4.7T に増強したものである。装置が完全に相似形の場合、構造物に発生する応力は磁場の大きさの 2 乗に比例するため、作用する電磁力は 1.6 倍となる。ただし、超伝導コイルとプラズマ間にブランケットを設置するスペースを確保するために、コイル巻き線部が占める領域を小さくする必要がある。そのため、コイルの電流密度を大きくしており、超伝導体に働く力はさらに厳しくなっている。FFHR-c1 の場合、磁場の大きさから gas-cooled HTS 型が必須とみられており、高い電流密度用に設計された導体に対して 2 -

(1) の均質化解析と同様に物性値を見積り、これをすべりと接触を考慮した全体解析モデルに与えた。支持構造物の材料は SUS316LN とし、d1 では、相当応力が最大で 800MPa 以下となったが、c1 では電磁力の増大に対応するために、基本板厚を 200mm とし、応力が高い開口部や垂直磁場コイルの接続部分の補強等を行い、相当応力が 100MPa 以下となることを目標に構造の改良を行った。全体解析の結果、最大 960MPa のミーゼス応力が内側垂直磁場コイルの接続部に発生したが、ピーク応力とみられ許容されるレベルであった。広域的にはヘリカルコイルケースの底部分が 700MPa で比較的高い結果となった。図 8 は非線形挙動が顕著に表れたヘリカルコイル底部分の変位分布図である。すべりと接触を考慮することで、線形解析では得ることができない挙動を詳細に模擬することができた。

この全体解析の結果をもとに、超伝導体部分の局所解析を行った。ヘリカルコイルの内側赤道部付近での超伝導素線部の巻き線方向の引張応力としておよそ 300MPa が作用する結果が得られ、使用している超伝導材料に対して十分許容範囲であることが確認された。図 9 はヘリカルコイルの外周部に新たに設置された補助ヘリカルコイル部での高応力部分に着目した局所解析の結果である。絶縁物に作用するせん断応力は厳しい値であるが、高強度の材料を使用することにより健全性が保たれると見込まれる。

(5) まとめ

一連の解析の流れは、超伝導体に相当するミクロ部分、全体構造に相当するマクロ部分の構造が変わっても適用可能であり、核融合炉のような巨大で複雑な構造を持つ対象であっても応力/ひずみ/変位分布および健全性評価に対し有効に適用できることが示された。

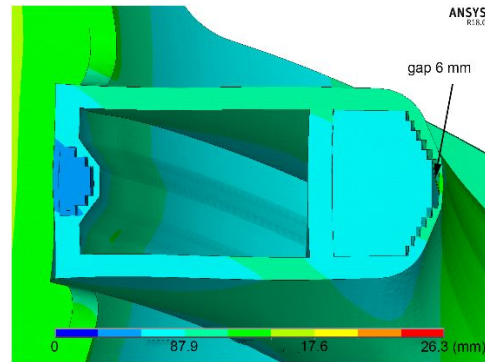


図 8 ヘリカルコイル巻き線部の変位分布と変形状態

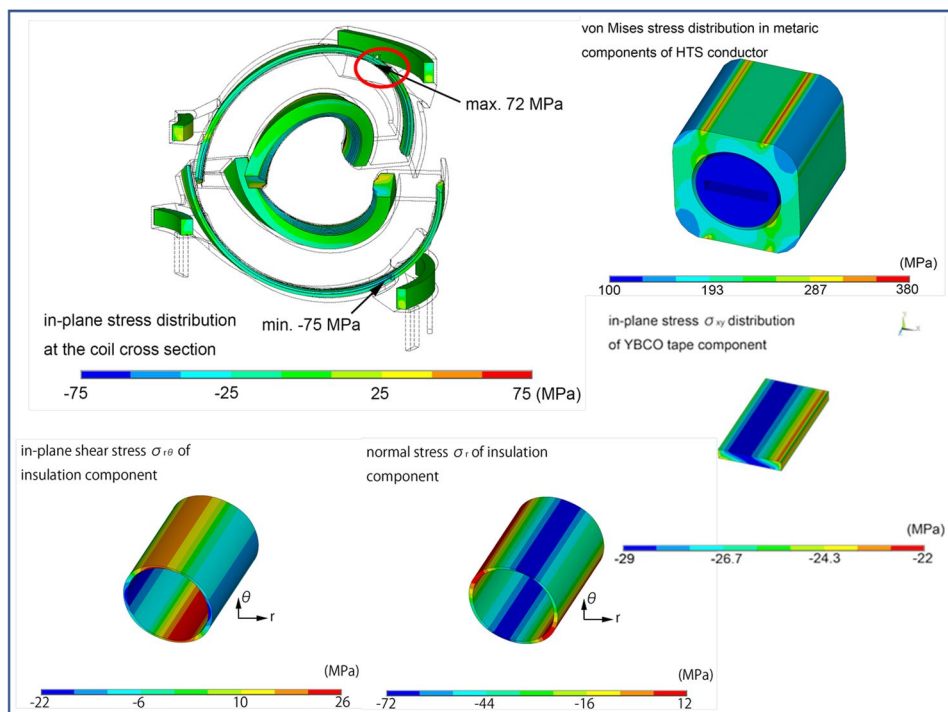


図 9 コイル巻き線部の最大応力発生部分の局所解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tamura H, Goto T, Miyazawa J, Tanaka T, Yanagi N	4. 巻 1559
2. 論文標題 Topology optimization for superconducting magnet system in helical fusion reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012108 7pp
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1088/1742-6596/1559/1/012108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tamura Hitoshi, Yanagi Nagato, Goto Takuya, Miyazawa Junichi, Tanaka Teruya, Sagara Akio, Ito Satoshi, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 75
2. 論文標題 Mechanical Design Concept of Superconducting Magnet System for Helical Fusion Reactor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 384 ~ 390
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1080/15361055.2019.1603041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tamura Hitoshi, Goto Takuya, Yanagi Nagato, Miyazawa Junichi, Tanaka Teruya, Sagara Akio, Ito Satoshi, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 146
2. 論文標題 Effect of coil configuration parameters on the mechanical behavior of the superconducting magnet system in the helical fusion reactor FFHR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 586 ~ 589
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi, Takuya Goto, Junichi Miyazawa, Teruya Tanaka, Akio Sagara, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume	4. 巻 124
2. 論文標題 Design modification of structural components for the helical fusion reactor FFHR-d1 with challenging options	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 605-609
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tamura Hitoshi, Yanagi Nagato, Takahata Kazuya, Sagara Akio, Ito Satoshi, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Multiscale Stress Analysis and 3D Fitting Structure of Superconducting Coils for the Helical Fusion Reactor	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4202405 5pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1109/TASC.2016.2531008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Hitoshi Tamura, Takuya Goto, Junichi Miyazawa, Nagato Yanagi
2. 発表標題 Topology optimization for superconducting magnet system in LHD-type helical fusion reactor FFHR-c1
3. 学会等名 ACASC/Asian ICMC/CSSJ Joint conference, 1/6-9, Ginowan, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Goto, J. Miyazawa, T. Tanaka and N Yanagi
2. 発表標題 Topology optimization for superconducting magnet system in helical fusion reactor
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019), 9/1-5, Glasgow, UK (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Goto, J. Miyazawa, T. Tanaka and N Yanagi
2. 発表標題 Topology optimization study for magnet support in helical fusion reactor
3. 学会等名 28th International Toki Conference (ITC28), 11/5-8, Toki, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村 仁, 後藤拓也, 宮澤順一, 田中照也, 柳 長門
2. 発表標題 トポロジー最適化によるヘリカル型核融合炉用超伝導マグネットシステムの最適化設計
3. 学会等名 プラズマ核融合学会, 11/29-12/2, 中部大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Goto, N. Yanagi, J. Miyazawa, T. Tanaka, A. Sagara, S. Ito, and H. Hashizume
2. 発表標題 Nonlinear Structural Analysis of a Superconducting Coil and Support Structure for the Helical Fusion Reactor with Multiscale Element
3. 学会等名 4th HTS4Fusion Conductor Workshop, Nagoya, Japan, Mar 21-23 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Goto, N. Yanagi, J. Miyazawa, T. Tanaka, A. Sagara, S. Ito, and H. Hashizume
2. 発表標題 Effect of coil configuration parameters on the mechanical behavior of the superconducting magnet system in the helical fusion reactor FFHR
3. 学会等名 30th Symposium on Fusion Technology, Giardini Naxos, Sicily, Italy, Sep 16-21 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tamura, N. Yanagi, T. Goto, J. Miyazawa, T. Tanaka, A. Sagara, S. Ito, and H. Hashizume
2. 発表標題 Mechanical design conception of a superconducting magnet system for a helical fusion reactor
3. 学会等名 The Technology of Fusion Energy, Orlando, FL, USA, Nov 11-15 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村 仁, 後藤拓也, 柳 長門, 宮澤順一, 田中照也, 相良明男, 伊藤 悟, 橋爪秀利
2. 発表標題 ヘリカル型核融合炉FFHRにおける超伝導マグネットシステムの機械的挙動に与えるコイル構成パラメータの影響
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Goto, J. Miyazawa, T. Tanaka, N. Yanagi, A. Sagara, S. Ito, and H. Hashizume
2. 発表標題 Nonlinear multiscale structural analysis of a superconducting coil and support structure for the helical fusion reactor
3. 学会等名 25th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村 仁, 柳 長門, 宮澤 順一, 後藤 拓也, 田中 照也, 相良 明男
2. 発表標題 ヘリカル型核融合炉FFHR-c1のマグネット支持構造物の非線形構造解析
3. 学会等名 2017年度秋季超電導・低温学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村 仁, 柳 長門, 宮澤 順一, 後藤 拓也, 田中 照也, 相良 明男
2. 発表標題 FFHR-d1 challenging option へ向けた構造最適化
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi, Takuya Goto, Junichi Miyazawa, Teruya Tanaka, Akio Sagara, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Design optimization of structural components for the helical fusion reactor FFHR-d1 with challenging options
3. 学会等名 29th edition of the Symposium on Fusion Technology (SOFT 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----