

SMESの利用

-高温超電導SMESコイルの概略設計-

野村新一
(明治大学)

1. SMES用コイル巻線形状の最適化
2. 電磁力平衡コイルを用いたSMESの概略設計

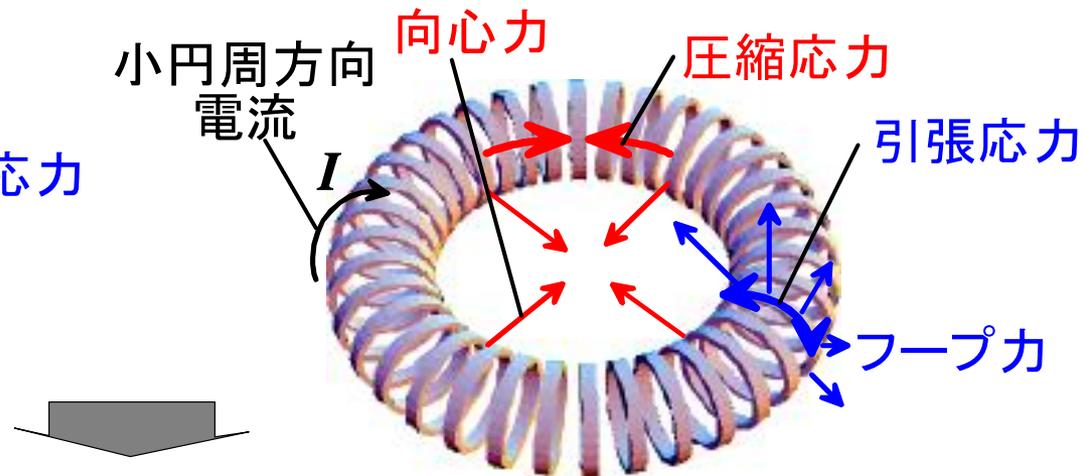
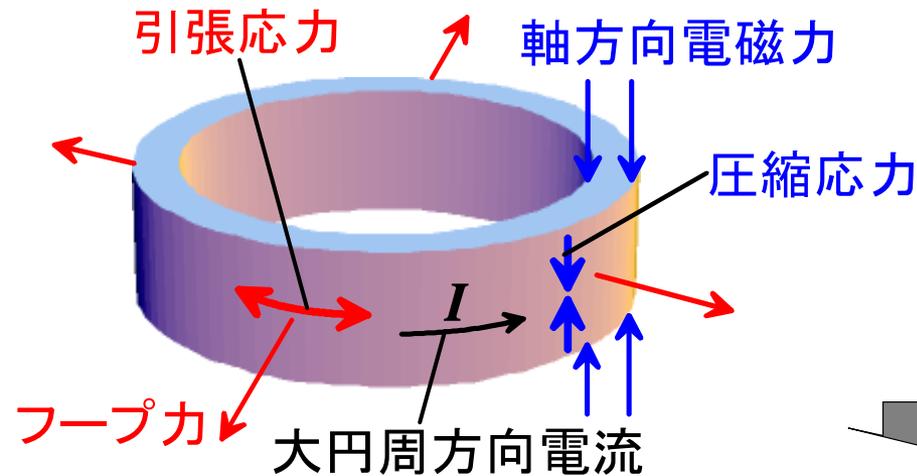
電磁力平衡コイルの概念

磁気エネルギーの貯蔵

電磁力で生じる**引張応力に耐えるだけの支持構造物**が必要になる。

ソレノイド

トロイダル磁界コイル

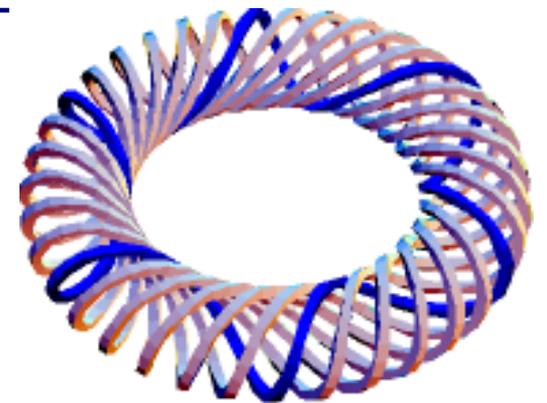


ヘリカル巻線形状の電磁力平衡コイルの可能性

トロイダル磁界コイルとソレノイドのハイブリッドコイル
(電磁力を低減させる最適なヘリカル巻数の選定)

1. ソレノイドやトロイダル磁界コイルで発生する電磁力を互いに打ち消しあう。
2. 電磁力支持構造物をエネルギー貯蔵に必要な最低限の大きさにまで低減

構造物: ソレノイドの1/2以下, トロイダル磁界コイルの1/4

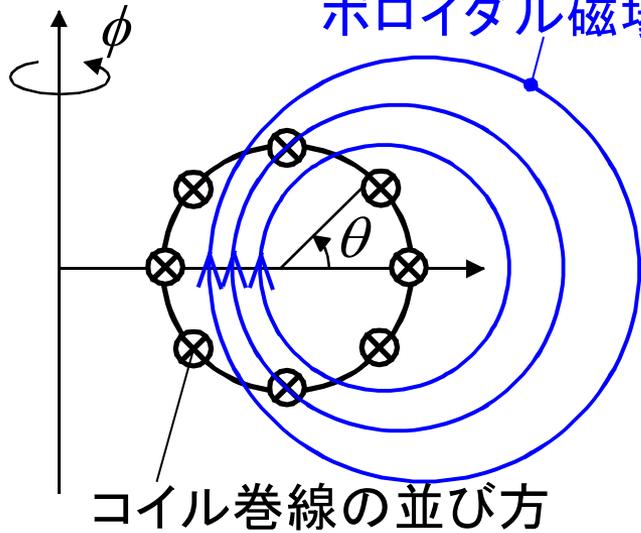


例)ヘリカル巻数6

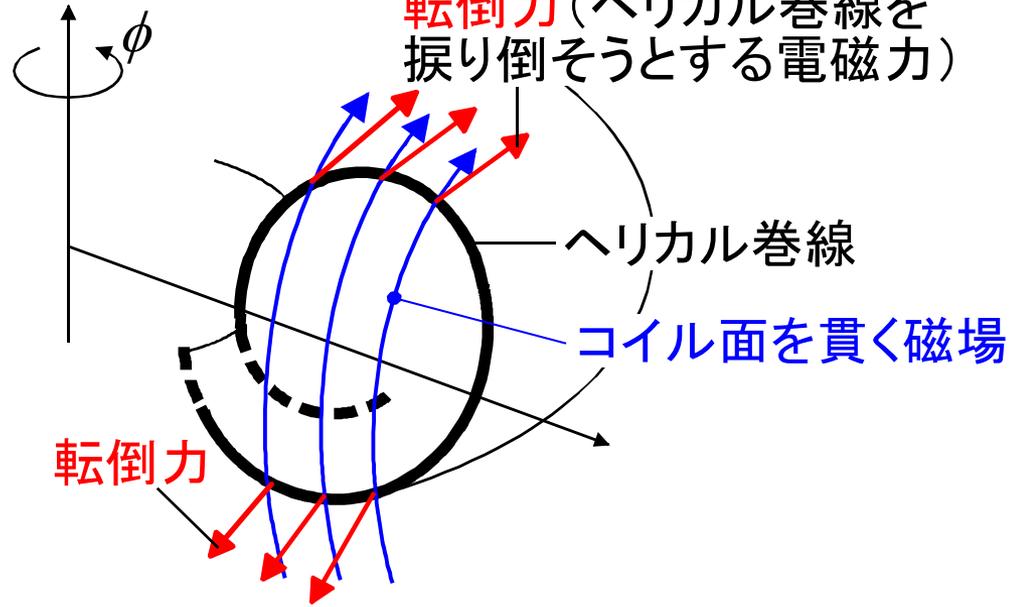
転倒力(捩り力)の低減化

通常のヘリカルコイル

ポロイダル磁場

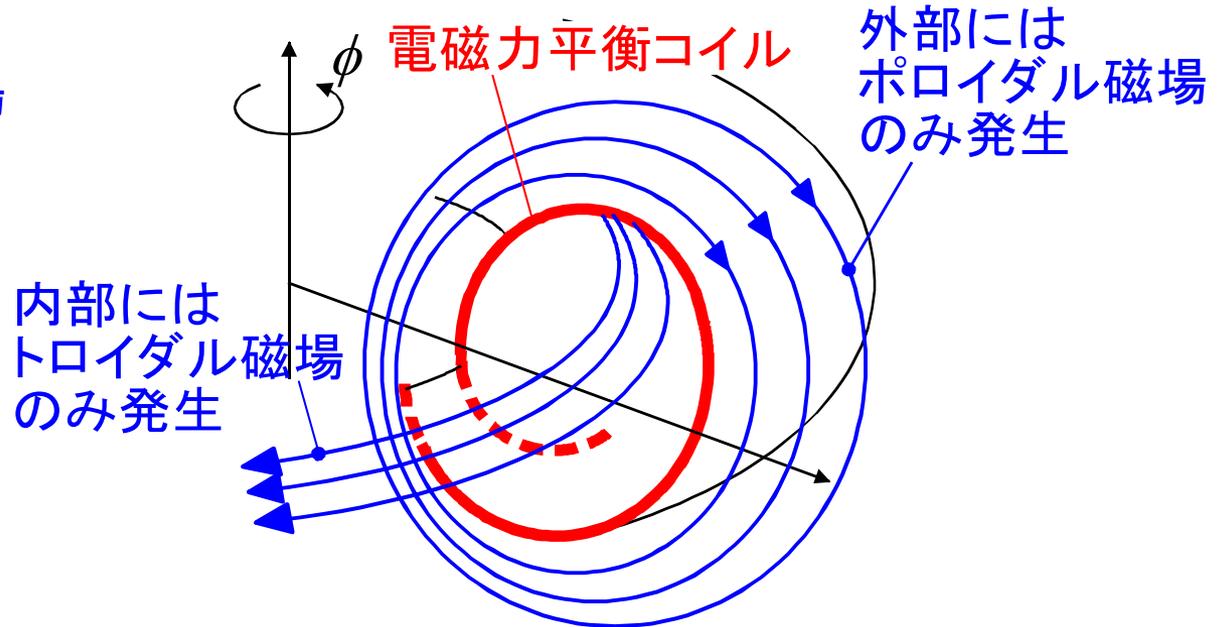
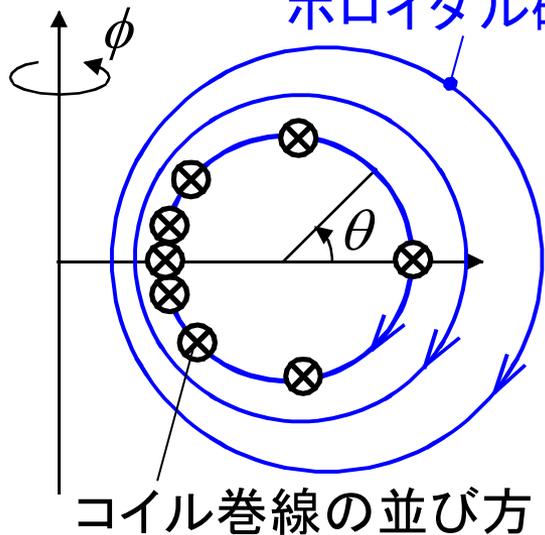


転倒力(ヘリカル巻線を捩り倒そうとする電磁力)



電磁力平衡コイル

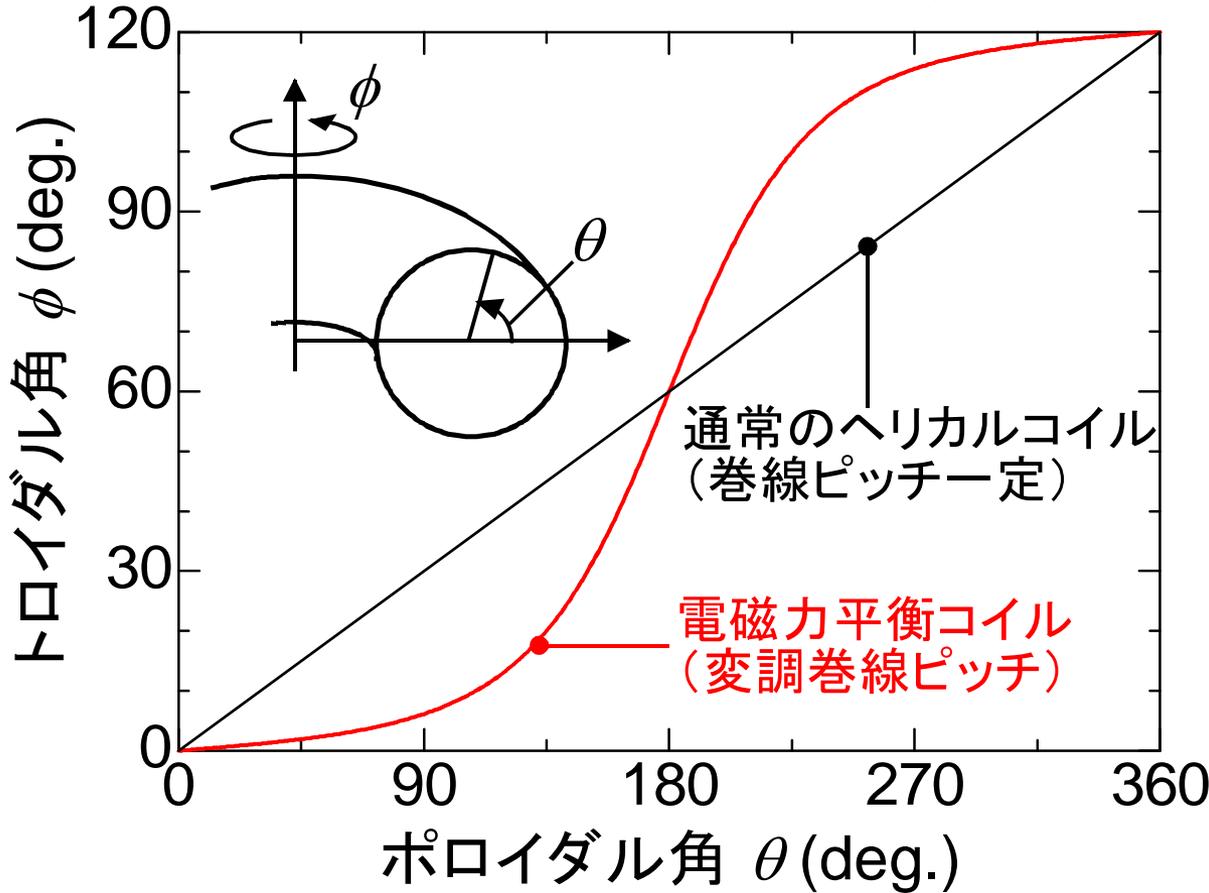
ポロイダル磁場



電磁力平衡コイルのヘリカル巻線ピッチ

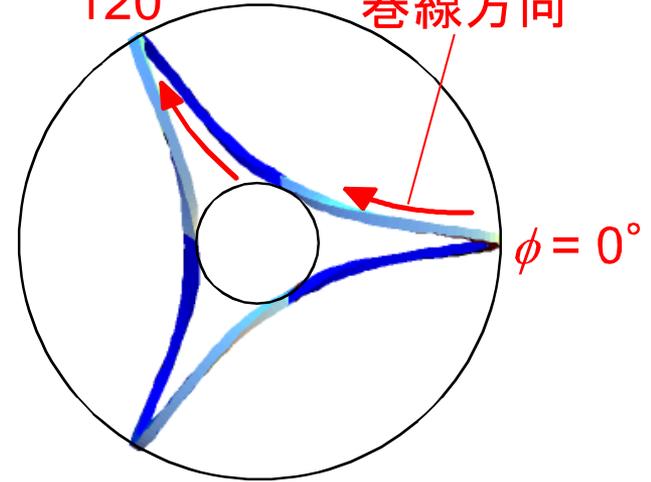
巻線ピッチを変調させることで転倒力を低減

例)ヘリカル巻数3ターンの巻線ピッチ

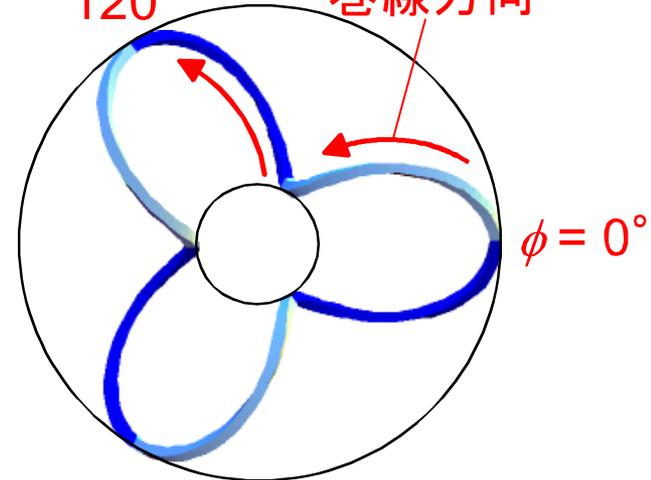


巻線形状(上から見た図)

電磁力平衡コイル
120° 巻線方向

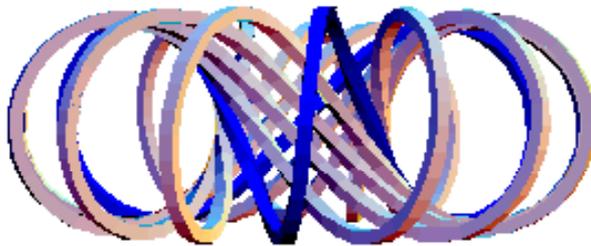
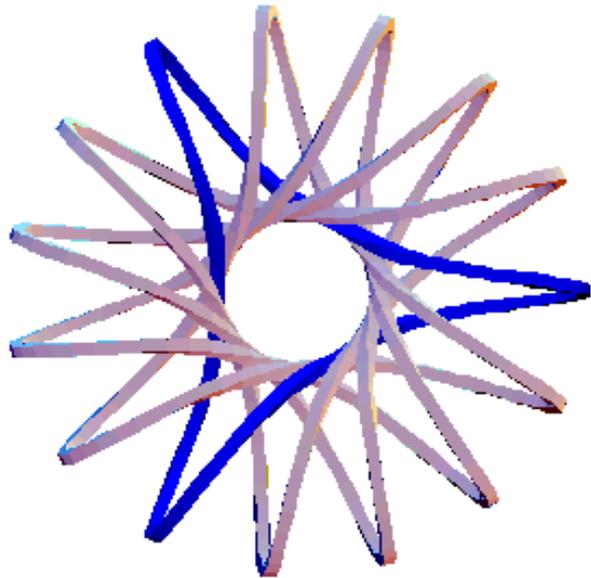


通常のヘリカルコイル
120° 巻線方向

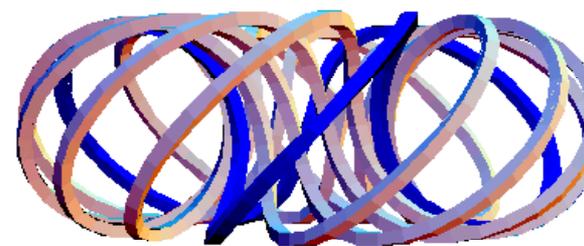
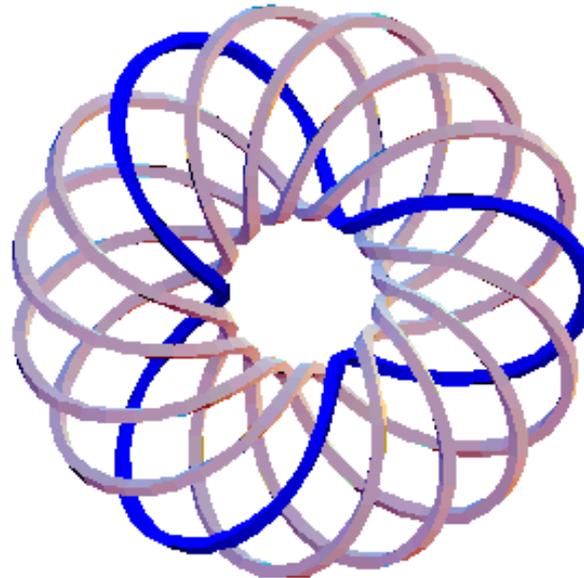


ヘリカル巻線ピッチとコイル外観

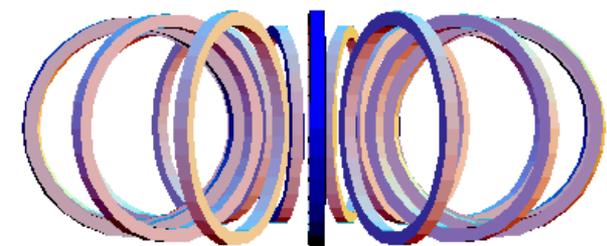
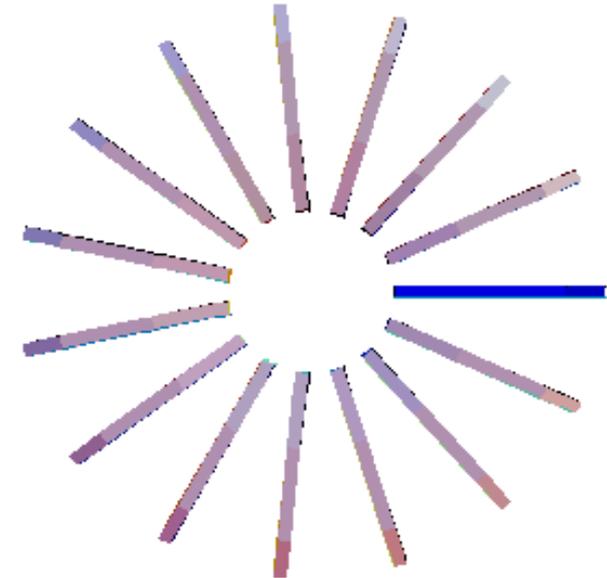
電磁力平衡コイル
(変調巻線ピッチ)



通常のヘリカルコイル
(巻線ピッチ一定)



トロイダル磁界コイル

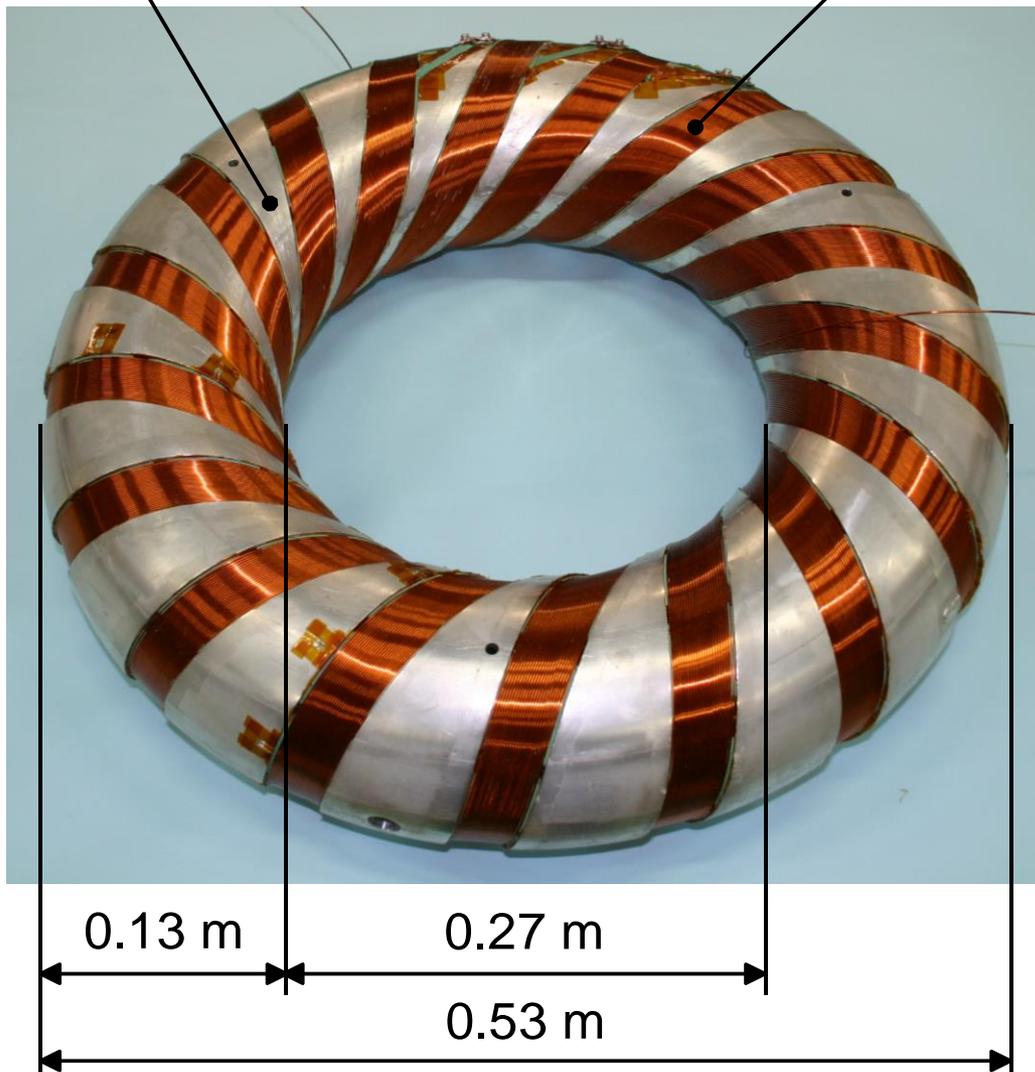


超電導電磁力平衡モデルコイルの開発

NbTi線を用いた手巻き製作による超電導電磁力平衡コイル

アルミ合金製巻枠

電磁力平衡コイル



大半径/小半径: 200 mm / 50 mm

ヘリカル巻線: 6ターン×3コイル

総ポロイダル巻数: 10584ターン

コイル臨界電流値: 552 A

自己インダクタンス: 1.8 H

最大発生磁束密度: 7.1 T

最大磁気エネルギー: 270 kJ

超電導線: NbTi

外径(絶縁前) ϕ 1.07 mm

外径(絶縁後) ϕ 1.17 mm

銅比1.66

巻枠素材: アルミニウム合金

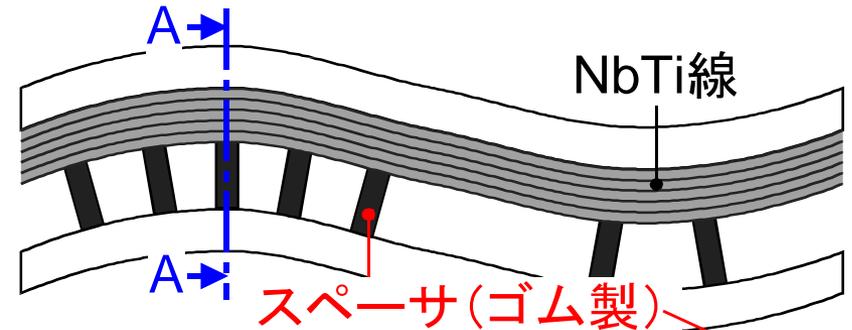
冷却方法: 液体ヘリウム浸漬冷却
(冷却温度4.2 K)

超電導電磁力平衡コイルの巻線技術

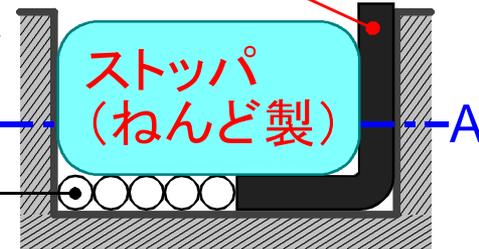
電磁力をNbTi線自体の引張応力で支持する構造とするため、エポキシ含浸やNbTi線にステンレス線などの補強材を使用せずに製作

手巻き巻線作業の様子

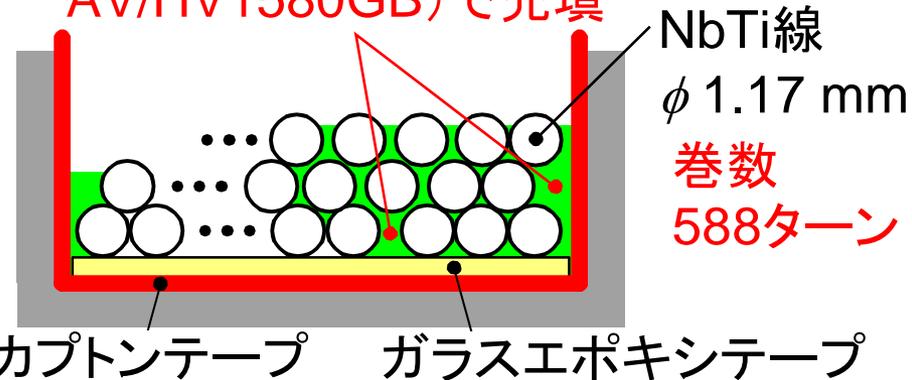
- ・二人一組で巻線作業
- ・総巻数10584ターンを4ヶ月で完成



スペーサとストッパで巻線を仮固定



隙間をエポキシパテ(アラルダイト AV/HV1580GB)で充填

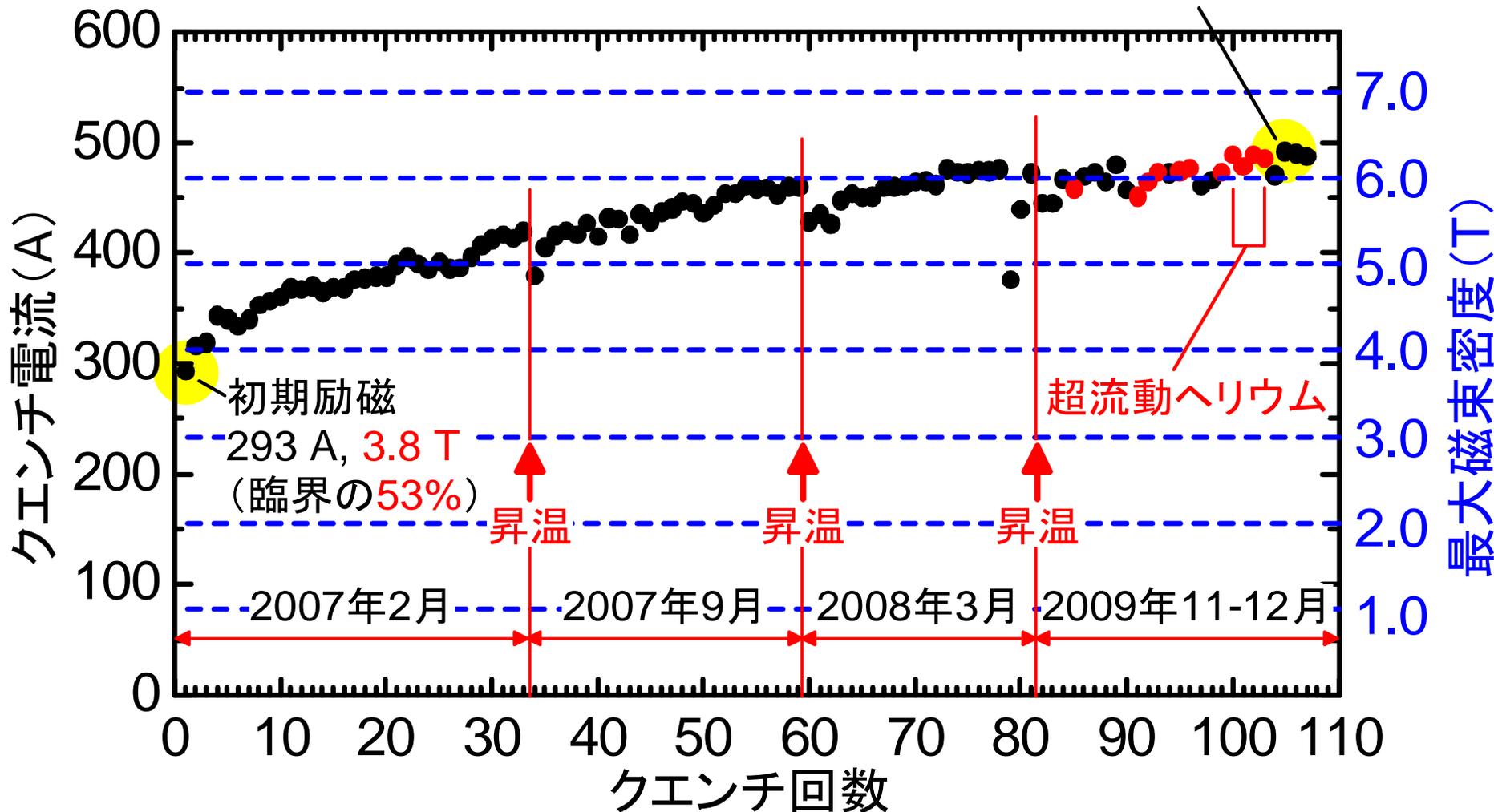


超電導電磁力平衡コイルのクエンチ特性

電流立ち上げ速度1 A/secでのクエンチ試験結果 (●4.2 K, ●過冷却)

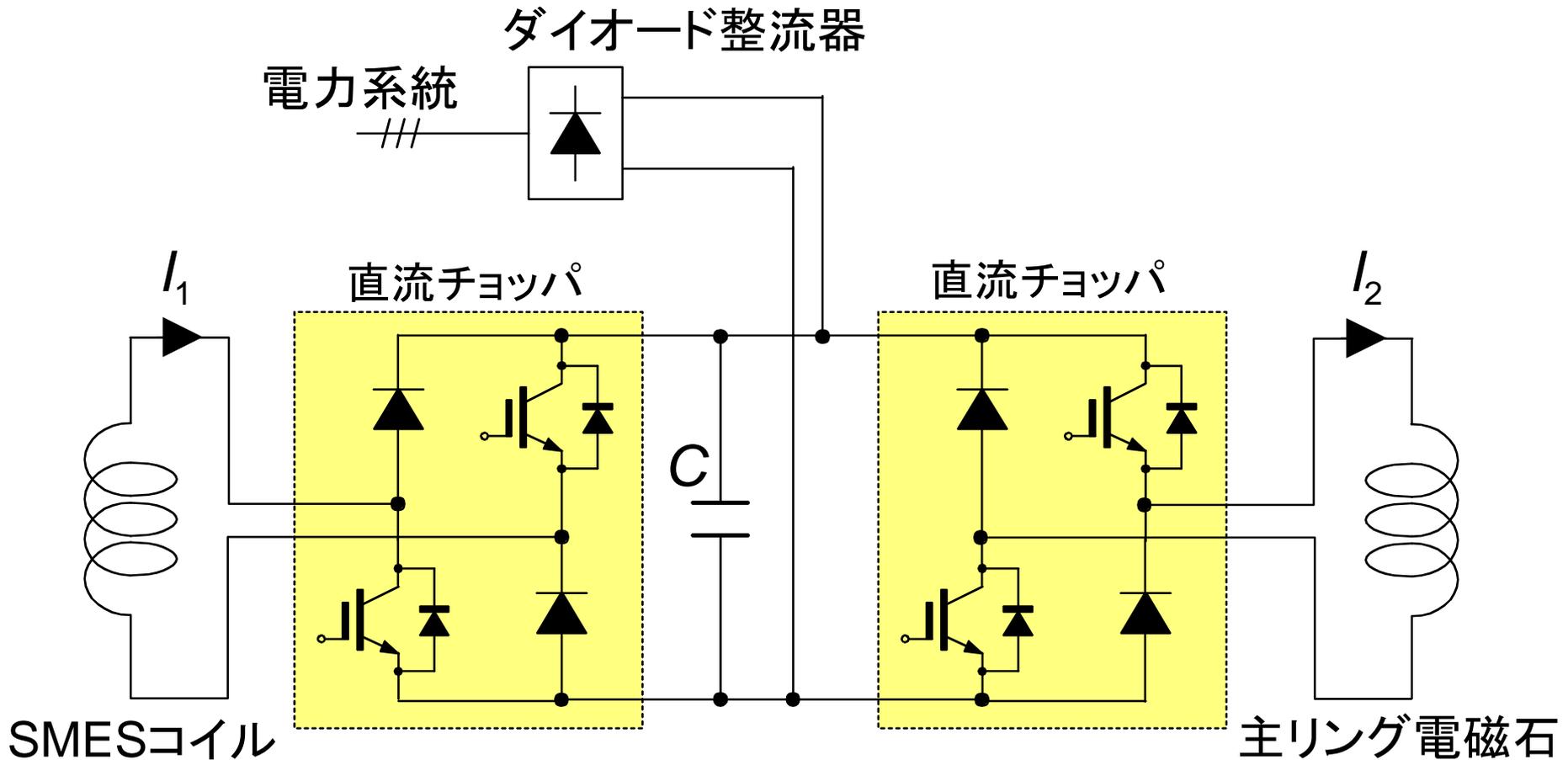
コイル臨界電流値: 552 A, 臨界磁場: 7.1 T

最大クエンチ電流 (4.2 K) 293 A, 6.3 T (臨界の89%)



SMES方式の電源構成

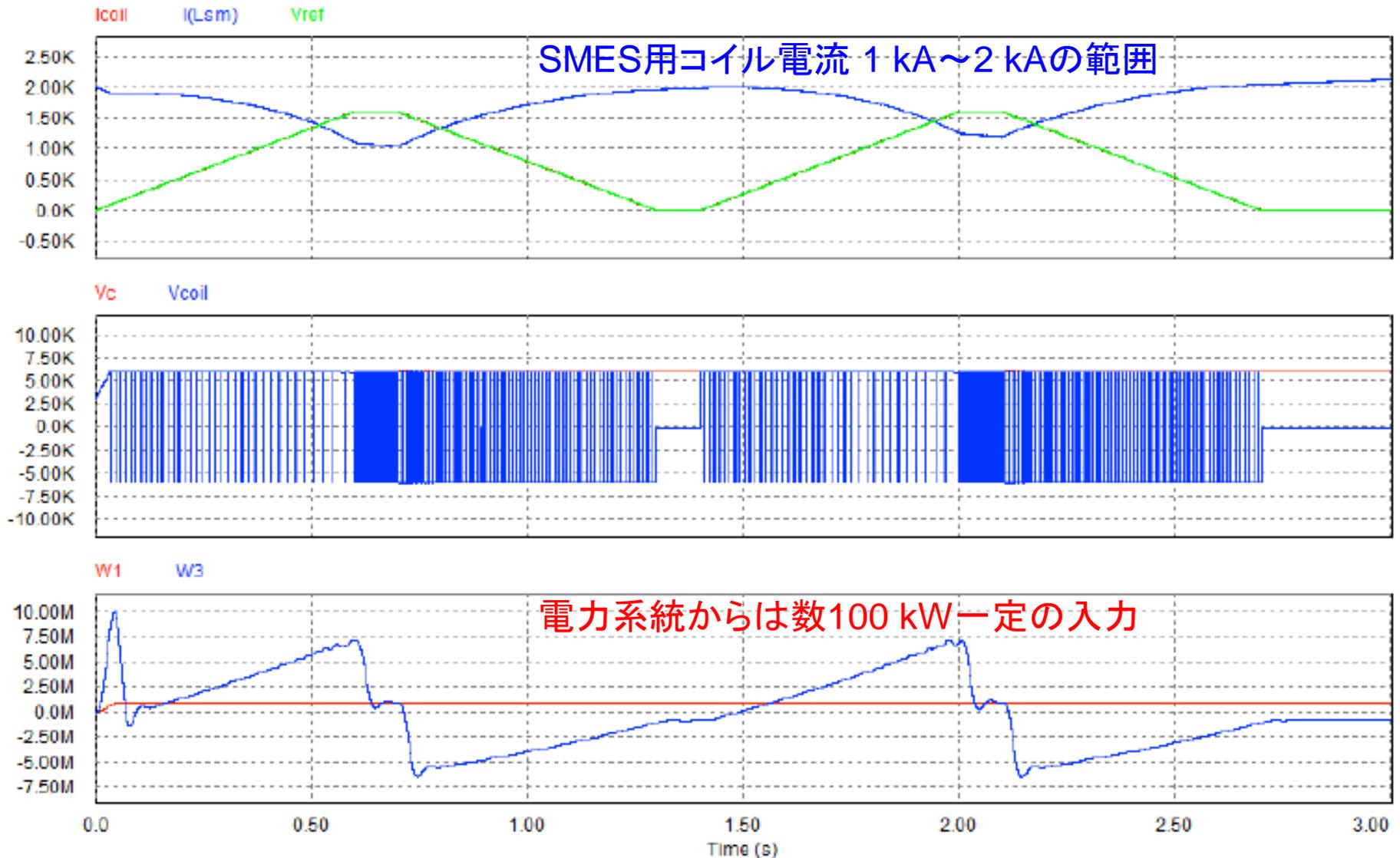
主リング電磁石1組分の電源構成



SMES側の直流チョッパでコンデンサ電圧を制御

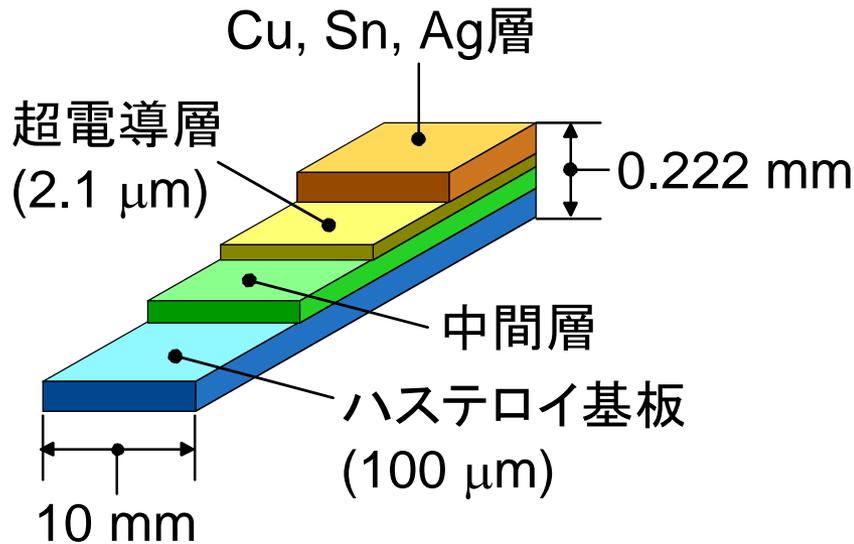
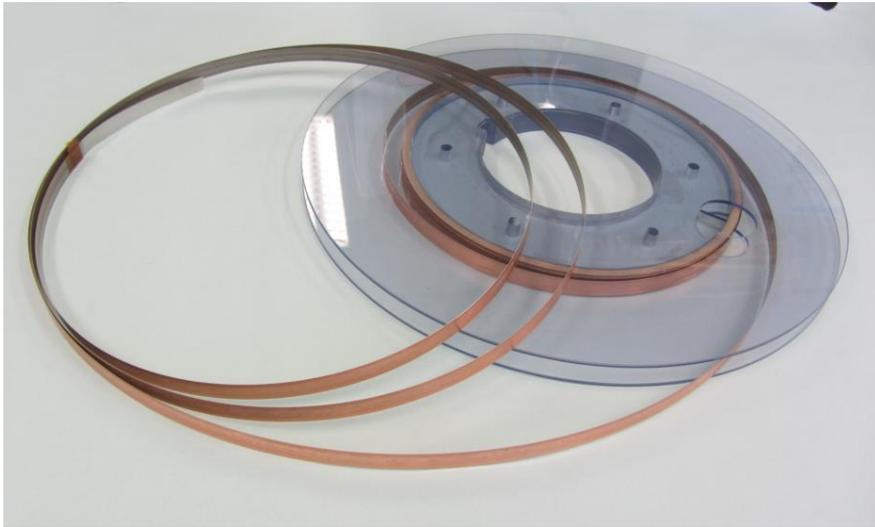
主リング電磁石から回生される磁気エネルギーはSMESに貯蔵

SMES方式のシミュレーション結果



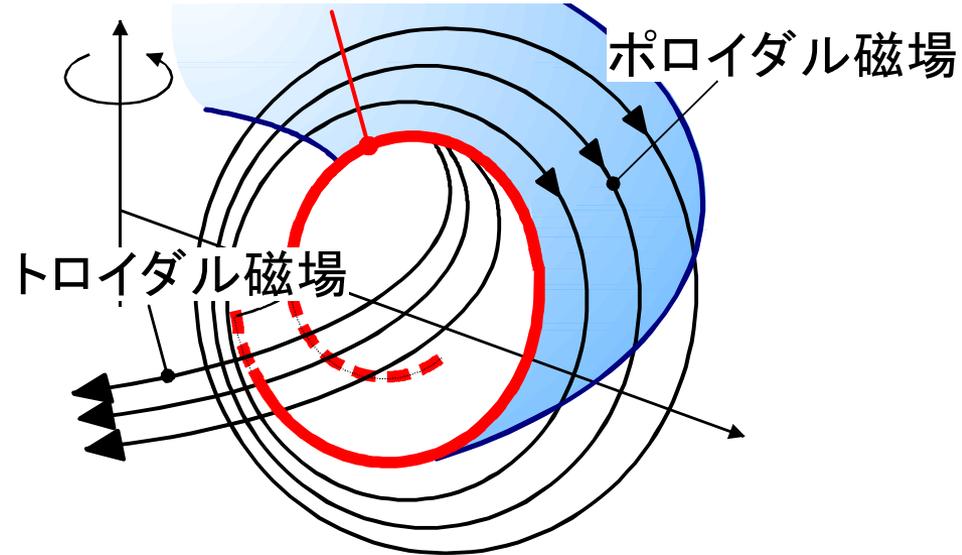
市販のY系 (GdBCO) 高温超電導テープ線材

フジクラ製Y系線材



テープ面を貫く磁場の低減

FBC巻線 (Y系線材)



臨界電流値

500 A程度 (77 K, 0 T)



期待される特性 (想定値)

1000 A at 50 K, 15 T

2500 A at 20 K, 15 T

電力変動補償用SMESの概略設計

基本仕様(主リング電磁石1組あたり)

最大貯蔵容量: **3.2 MJ**(うち**2.4 MJ**利用, 充放電率75%)

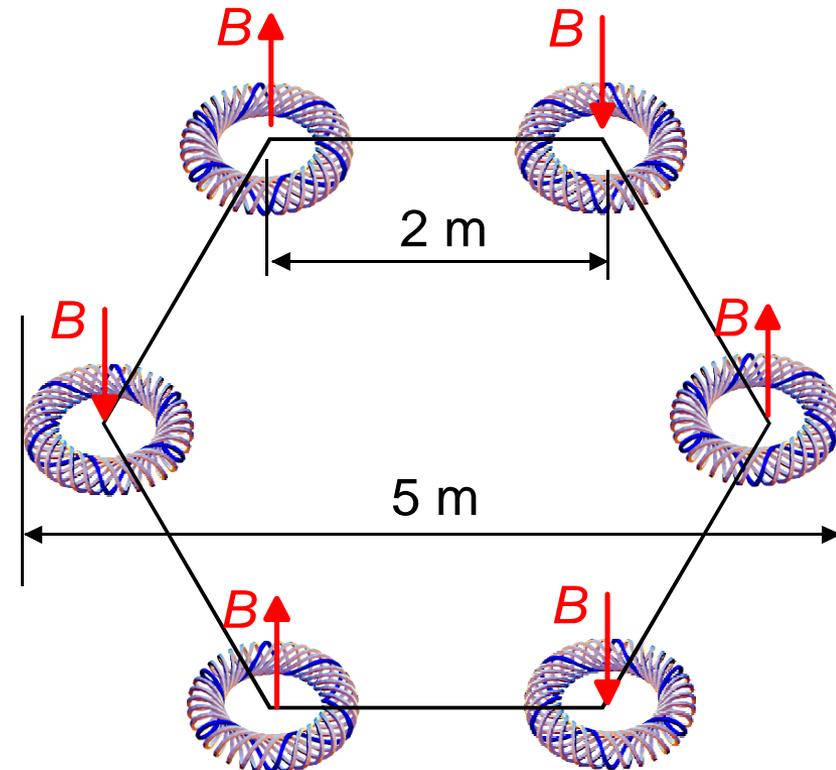
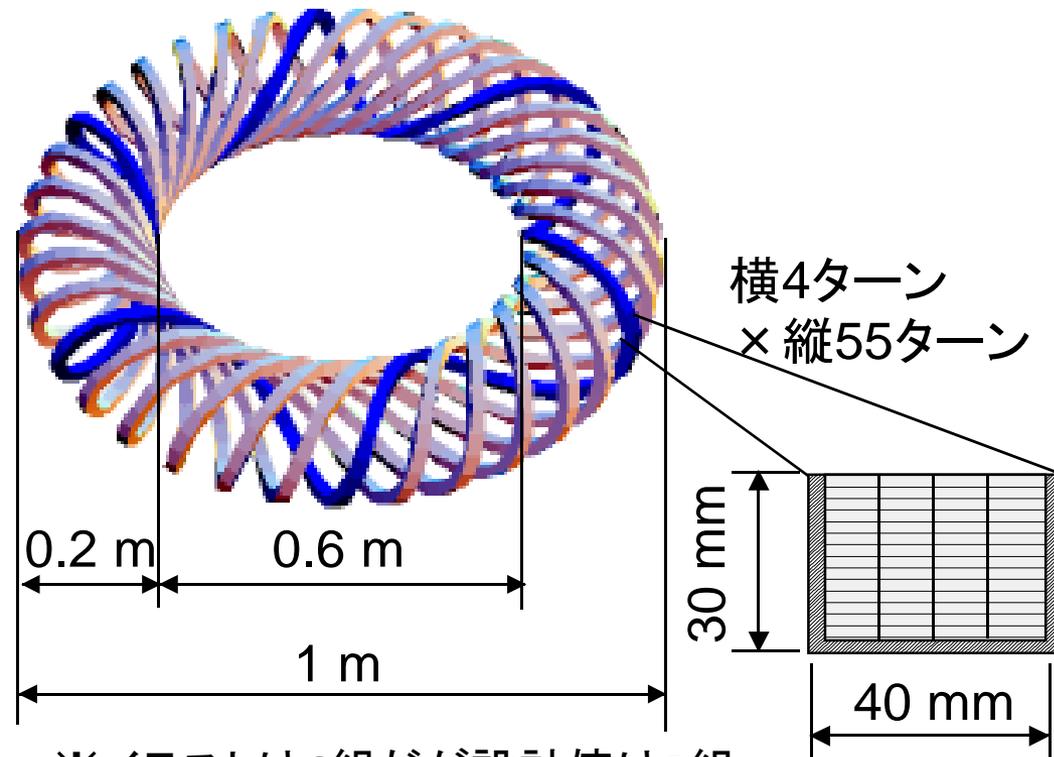
自己インダクタンス: **1.6 H**, コイル電流値: **2 kA**, 最大磁場: **9 T**

2 kA導体...20 Kで2枚積層導体, 50 Kで3枚積層導体

ヘリカル巻線: **ヘリカル巻数6ターン×5組×220ターン**

3.2 MJ電磁力平衡コイル

20 MJ級SMESコイル(主リング電磁石6組分)



高温超電導SMESの可能性

- Y系線材必要量

一続きのヘリカル巻線の長さ: **1 km** (連続800 mの開発実績あり)

2枚積層導体 (20 K) : 10 km, 3枚積層導体 (50 K) : 15 km

- 最大発生応力・・・ビリアル定理より概算

2枚積層導体 (20 K) : **160 MPa**, 3枚積層導体 (50 K) : **107 MPa**

Y系線材の Hastelloy 基板自体で電磁力支持の可能性



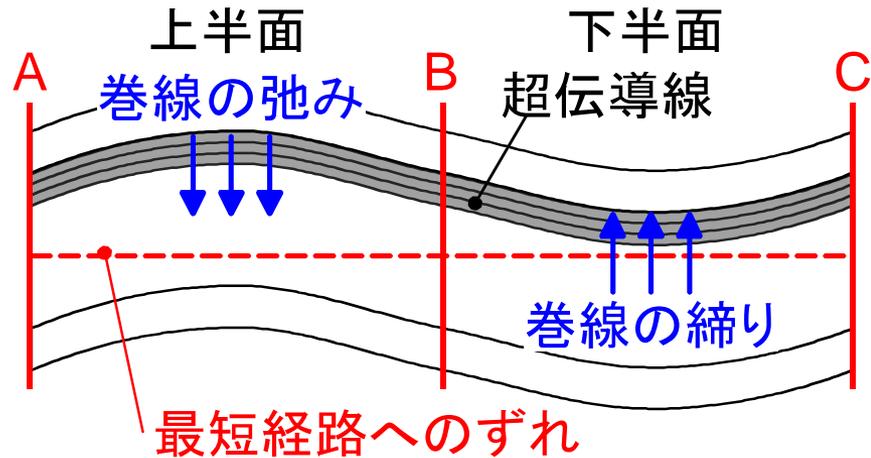
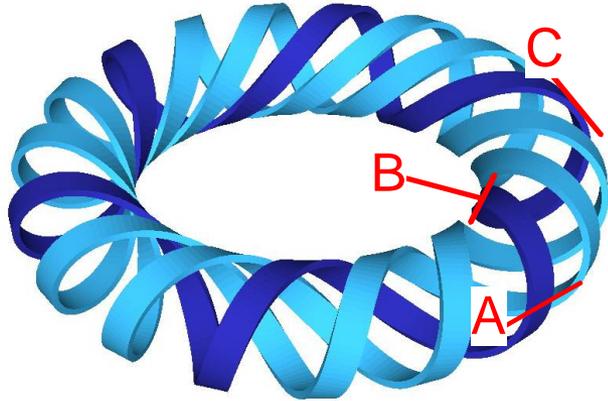
高温超電導SMESの可能性は期待できる

技術的課題

- コイル製作技術の確立・・・機械的ひずみに弱く塑性変形させられない
- コイル冷却温度の選定・・・20 Kあるいは50 K近傍の冷媒がない

高温超電導SMESの巻線技術の課題

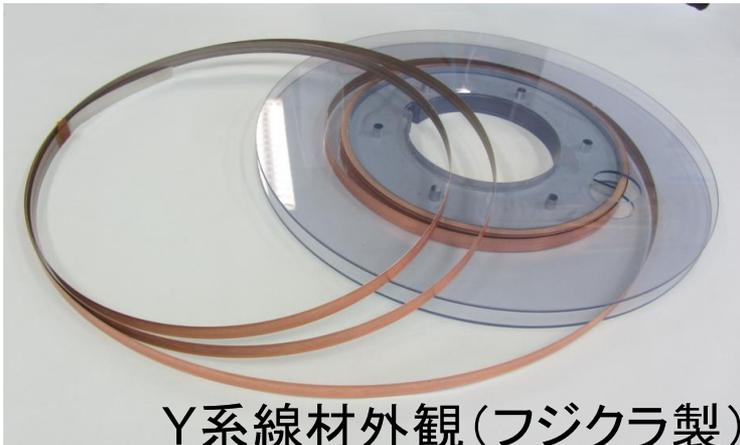
ヘリカル巻線の展開図



✓ 巻線の幅寄せ・仮固定作業が必要

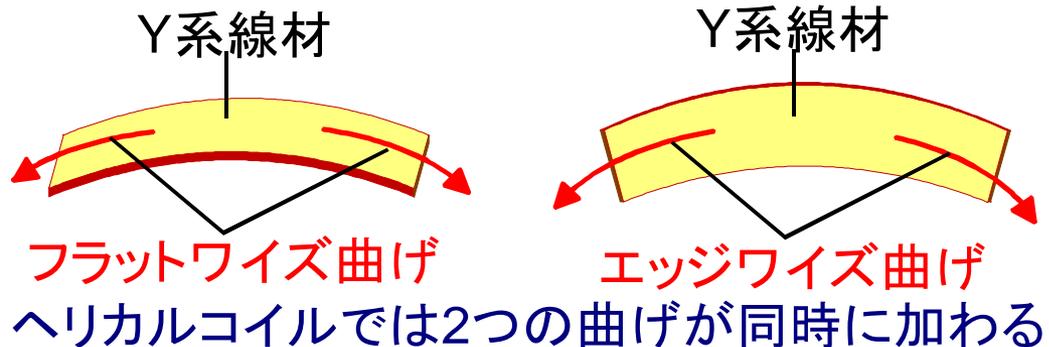
NbTi線のLHDでは導体を**塑性変形**させて調整

…高磁場線材では特性を劣化させる



Y系線材外観(フジクラ製)

● Y系線材に印加される曲げひずみ



強磁場先進超伝導ヘリカル巻線の開発研究

高温超電導線材を塑性変形させないヘリカル巻線技術の確立
平成25年度よりLHD計画共同研究として実施

ヘリカル巻線技術検討－明治大を研究拠点－

- 野村新一(明治大)…研究代表者・研究総括(立案・装置開発・実験)
試作機開発とヘリカル巻線技術検討
- 筒井広明(東工大)…ヘリカル巻線軌道・応力解析

ヘリカル巻線構造による線材特性評価－上智大を研究拠点－

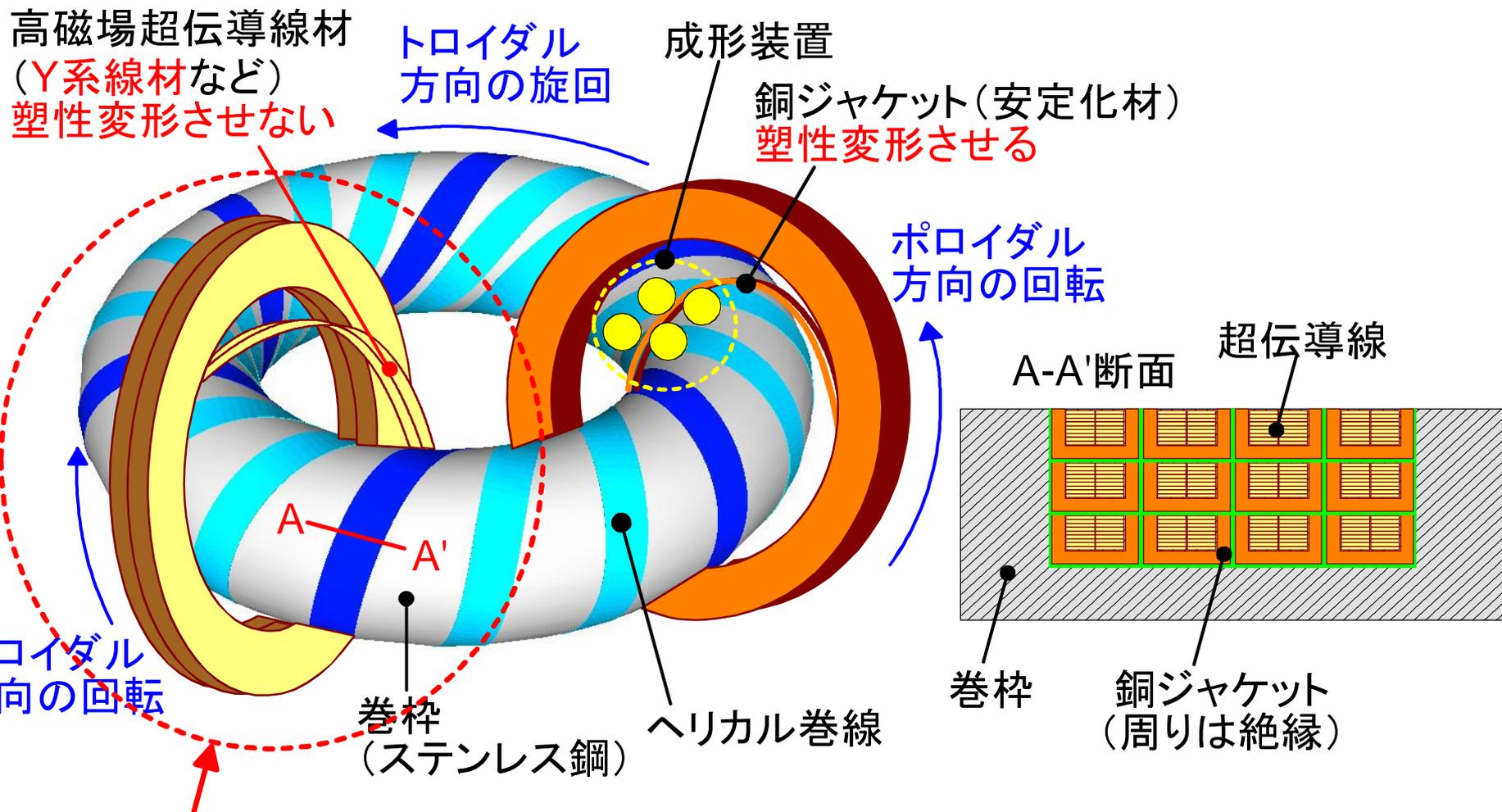
- 谷貝 剛(上智大)…複合曲げ特性試験装置開発と線材特性評価
- 中村武恒(京都大)…ヘリカル巻線構造の線材特性評価とモデル化

研究協力

- 力石浩孝(核融合研)…所内世話人・巻線機制御技術検討
- 柳 長門(核融合研)…大電流導体化技術検討
- 今川信作(核融合研)…ヘリカル巻線技術検討

線材を塑性変形させないヘリカル巻線技術

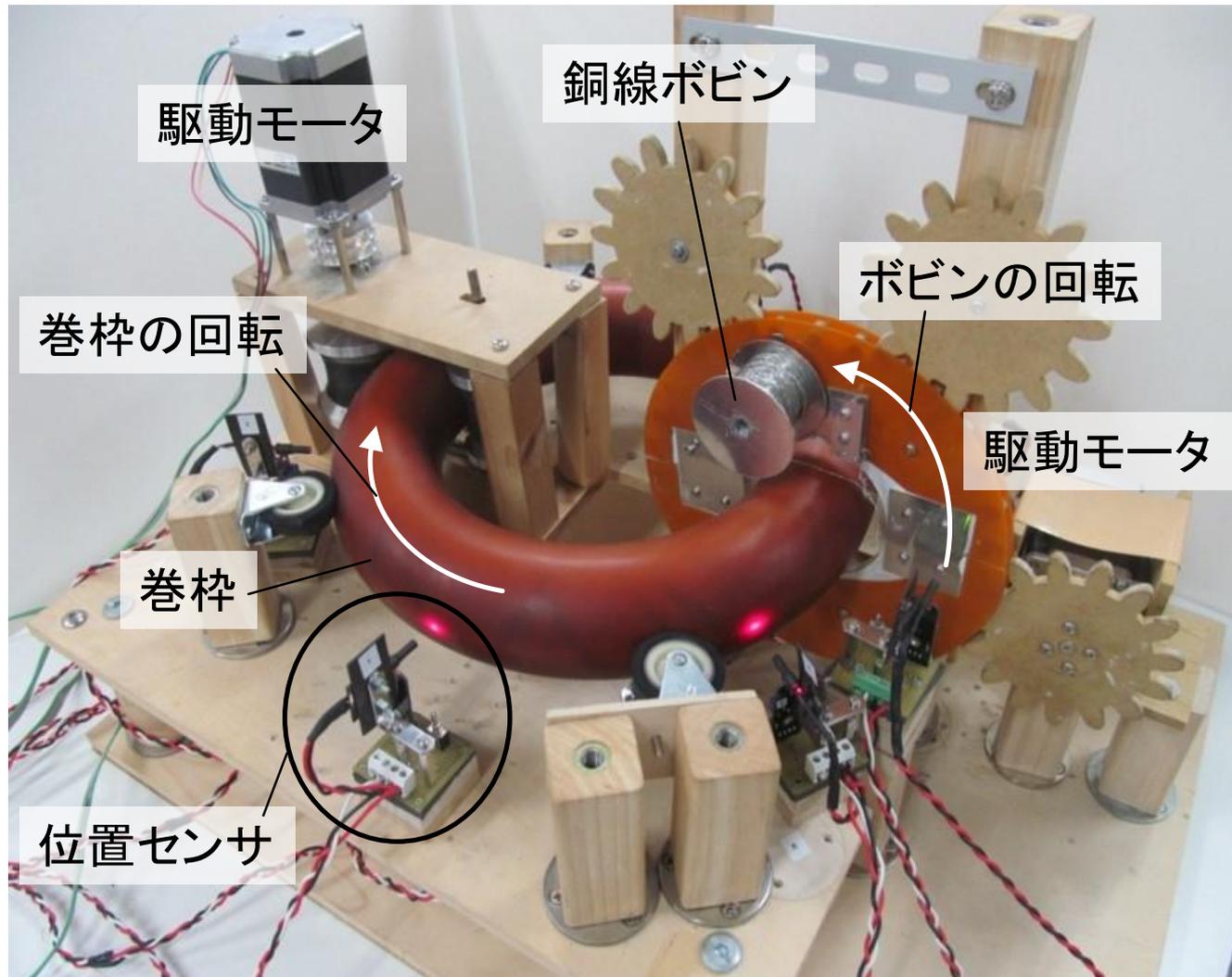
NIFS今川先生のアイデア・・・LHD計画共同研究で本年度から検討開始



高磁場超伝導線材を塑性変形させないようにボビンから送り出して巻枠に落とし込んでいくようなヘリカル巻線が可能なかどうか？

ヘリカル巻線機の試作機開発

手作りでヘリカル巻線機の開発を進めている。
丸型銅線の巻線に成功・・・目標はテープ線材の巻線機開発



Y系線材複合曲げ特性試験装置の開発

谷貝先生(上智大)が中心に装置開発, 線材特性評価

ヘリカル巻線で想定される曲げ, 引張, 振れなどの解析・予備実験結果を
詳細設計に反映し複合曲げ特性試験装置を完成・・・明治大中心に

試験装置側面図

Y系線材サンプル アームの回転で剥離

サンプルクランプ
(銅製)

起き上がりによる
曲げの印加

振れの
印加

ハンドルで
張力を印加

冷却ブロック 液体窒素
幅1.4 m

上面図

サンプルクランプが
回転して曲げを印加

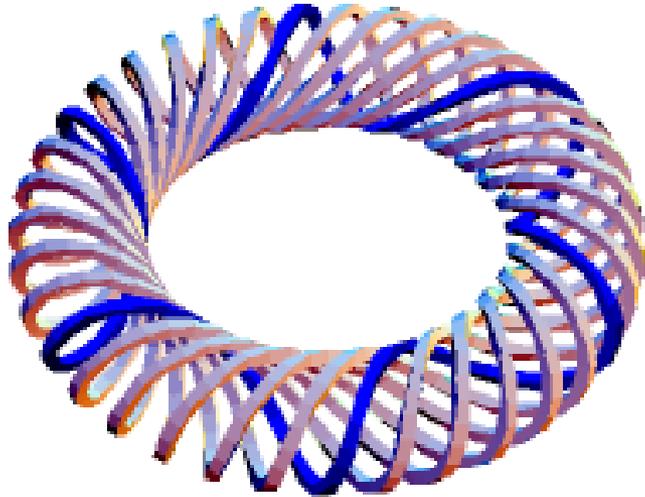
曲げガイド
の治具

サンプルクランプ Y系線材サンプル

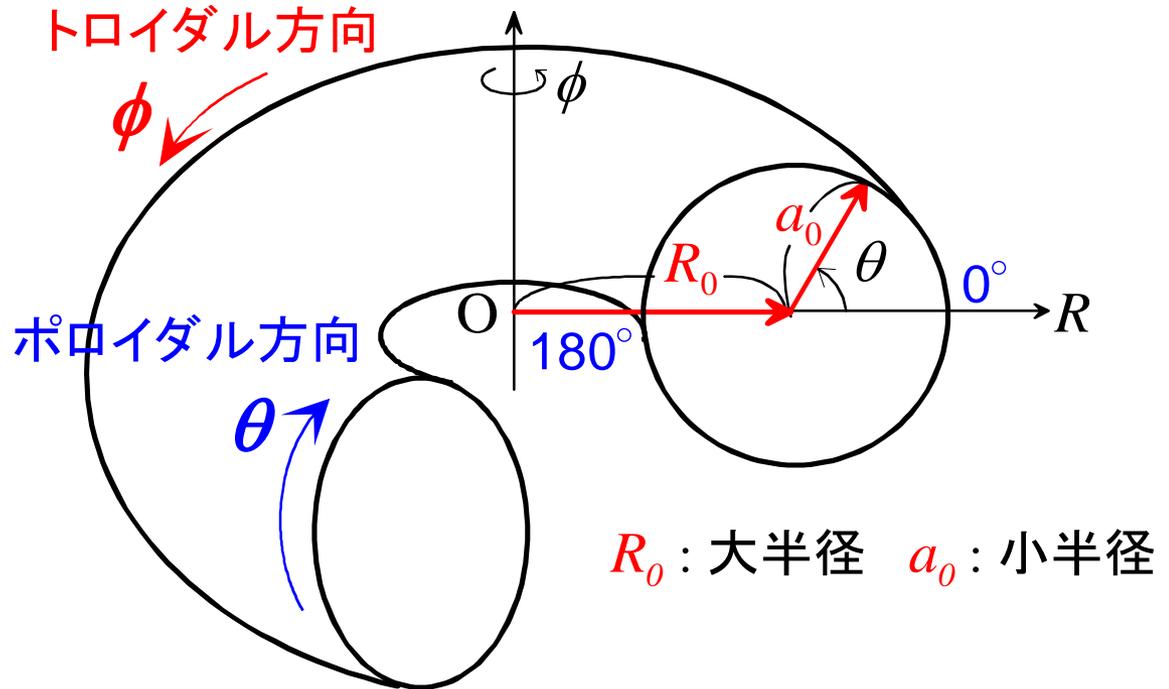
※試験装置全体はベルジャ内に格納され真空引きによる過冷却試験が可能

SMES用超電導コイルの座標系

電磁力平衡コイル



ヘリカル巻数 $N = 6$



最適化の重要なパラメータ ヘリカル巻数 N

ヘリカル巻線がトロイダル方向に1周する間にポロイダル方向に巻かれる巻数
(最適なヘリカル巻数はコイルアスペクト比(大半径/小半径)で決定される。)

上記の電磁力平衡コイルの例)

ヘリカル巻数が6ターンの複数のヘリカル巻線から構成された電磁力平衡コイル

エネルギー貯蔵用電磁力平衡コイル

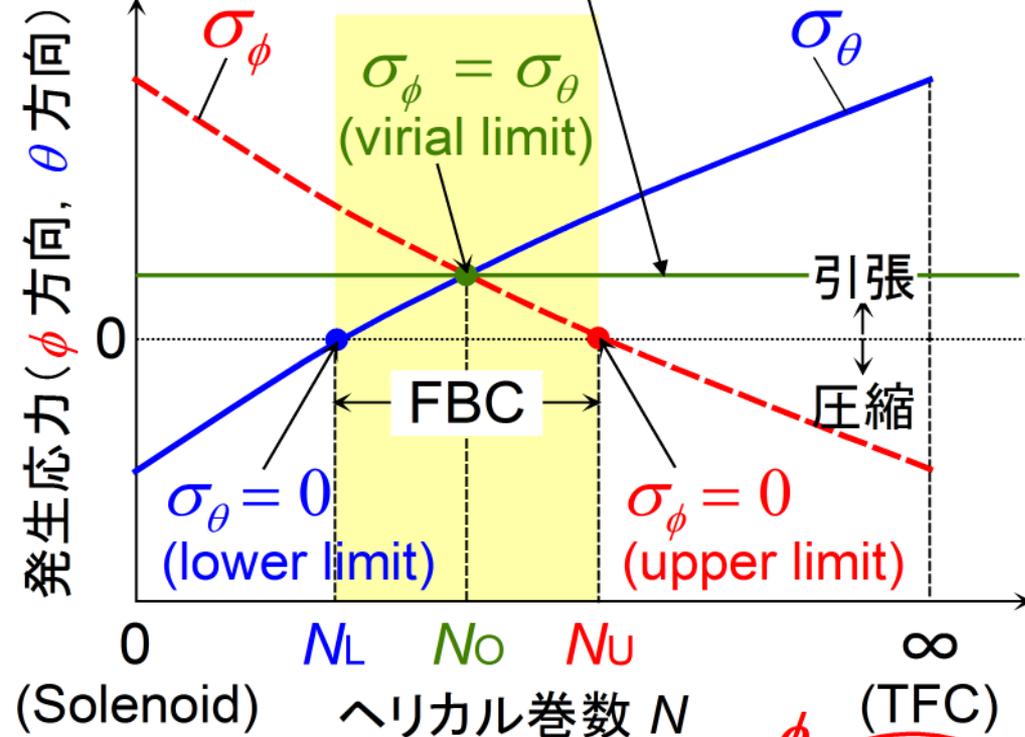
ビリアル定理 $\int (\sigma_\phi + \sigma_\theta) dv = E$

ヘリカル巻数と発生応力分布

エネルギー貯蔵に最低限必要な引張応力

トロイダル方向

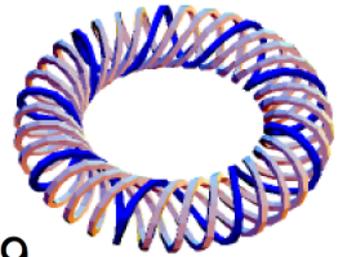
ポロイダル方向



電磁力平衡コイル(FBC)

- *Upper limit* -

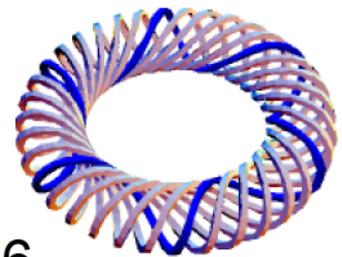
トロイダル方向
応力最小条件



$N = 9$

- *Virial limit* -

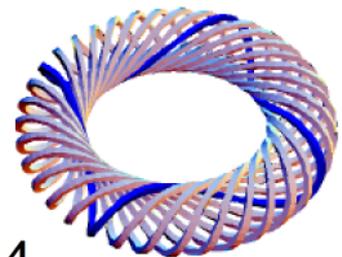
応力最小条件
(応力均一化)



$N = 6$

- *Lower limit* -

ポロイダル方向
応力最小条件



$N = 4$

