



平成14年度 研究助成事業成果報告会
12月2日～3日 コンベンションセンターTOKYO



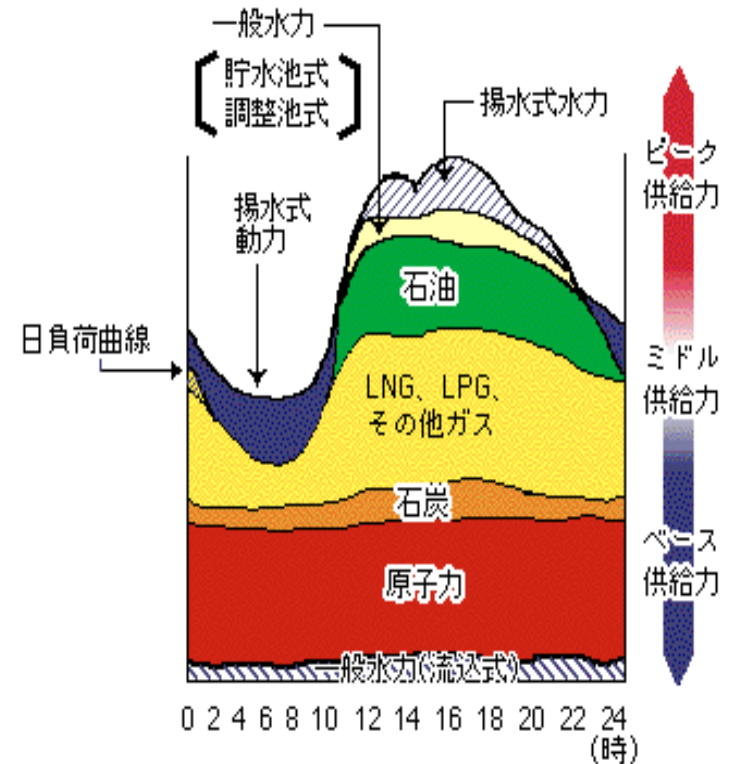
Virial定理によるエネルギー貯 蔵用超伝導コイルの最適化

Optimization of Superconducting Coil for Energy Storage
by Virial Theorem

筒井広明

東京工業大学・原子炉工学研究所

- 昼夜間・季節間の電力需要の格差... 負荷率の低下 (年負荷率55%)
- 原子力発電所などの電源設備の遠隔化... 長距離送電の安定化技術
- 電力自由化... 電力需要のみならず供給にも時間的・地域的な偏り・変動が予想される



電力設備の有効利用、電力の安定供給の観点から電力貯蔵設備が必要不可欠

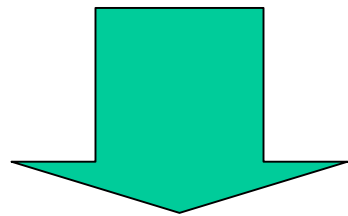


超伝導磁気エネルギー貯蔵



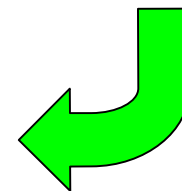
Superconducting Magnetic Energy Storage

- 超伝導コイルを用いて磁気エネルギーの形でのエネルギー貯蔵
- 高速応答性
- 貯蔵容量の大きなものは、超伝導コイルに生じる巨大な電磁力を岩盤等で支持する必要がある

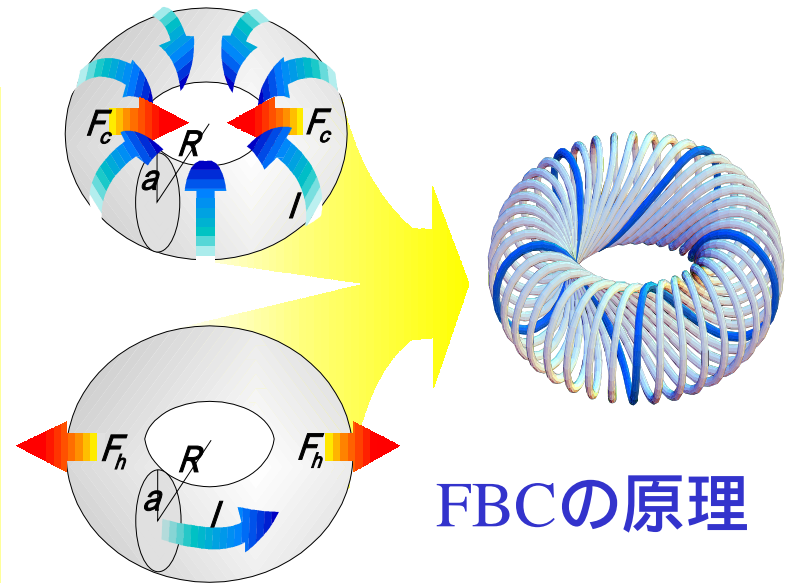


プラズマ平衡理論の応用

電磁力 / 応力の軽減



- 我々は、トロイダル磁場コイルと中心ソレノイドコイルを一体としたヘリカル型ハイブリッドコイル(電磁力平衡コイル, FBC)を用いたSMES装置を提案している。



- 更に、Virial定理(平衡状態での各種エネルギーの関係式)を用いて、FBCの概念を拡張し、応力最小コイル(**Virial限界コイル**, VLC)の条件を示した。
- 本研究は、VLCの概念が成り立つことを、実験的に示すことを目的とする。



Virial Theorem

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathbf{S} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

\mathbf{j} : current density

\mathbf{B} : magnetic field

\mathbf{S} : stress tensor

平衡方程式

$$\nabla \cdot (\mathbf{T} + \mathbf{S}) = 0$$

$$\mathbf{T} \equiv \frac{1}{\mu_0} \left(\mathbf{B}\mathbf{B} - \frac{B^2}{2} \mathbf{I} \right)$$

\mathbf{T} : Maxwell stress tensor

$$\tilde{\sigma} \equiv \frac{V_\Omega}{U_M} \sigma$$

$$\langle \sigma \rangle \equiv \frac{\int \sigma dV}{V_\Omega}$$

$$\int \text{Tr}(\mathbf{T} + \mathbf{S}) dV = 0$$

$$\int \sum_{i=1}^3 \sigma_i dV = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV \equiv U_M > 0$$

σ_i : principal stress

$$\left\langle \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_i \right\rangle = 1$$

- Positive stress (**tension**) is required to hold the field.
- Uniform tension is favorable.
- Theoretical limit is determined.

$$\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3 = \frac{1}{3}$$

応力 σ はアスペクト比 A とピッチ数 N の関数として表される。

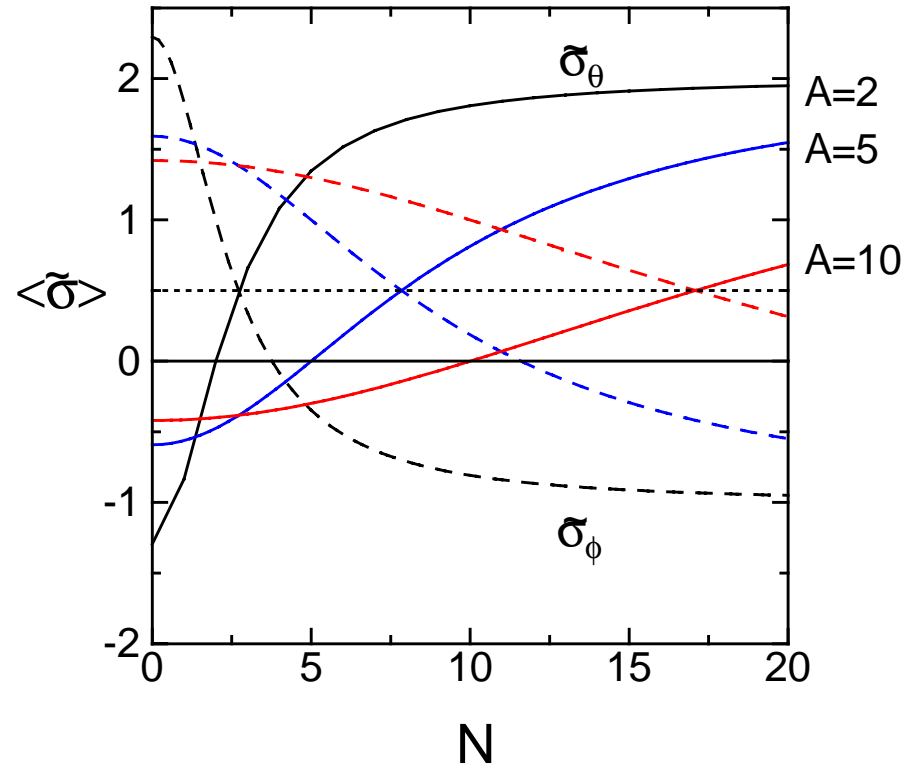
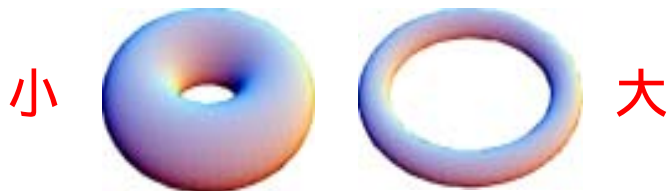
$$\langle \tilde{\sigma}_\theta \rangle = \frac{N^2 - A^2}{\frac{N^2}{2} + A^2 \log 8A - 2A^2}$$

$$\langle \tilde{\sigma}_\phi \rangle = \frac{A^2 \log 8A - A^2 - \frac{N^2}{2}}{\frac{N^2}{2} + A^2 \log 8A - 2A^2}$$

$$\langle \tilde{\sigma}_\theta \rangle + \langle \tilde{\sigma}_\phi \rangle = 1$$

$N \equiv \frac{I_\theta}{I_\phi}$: コイルのピッチ数

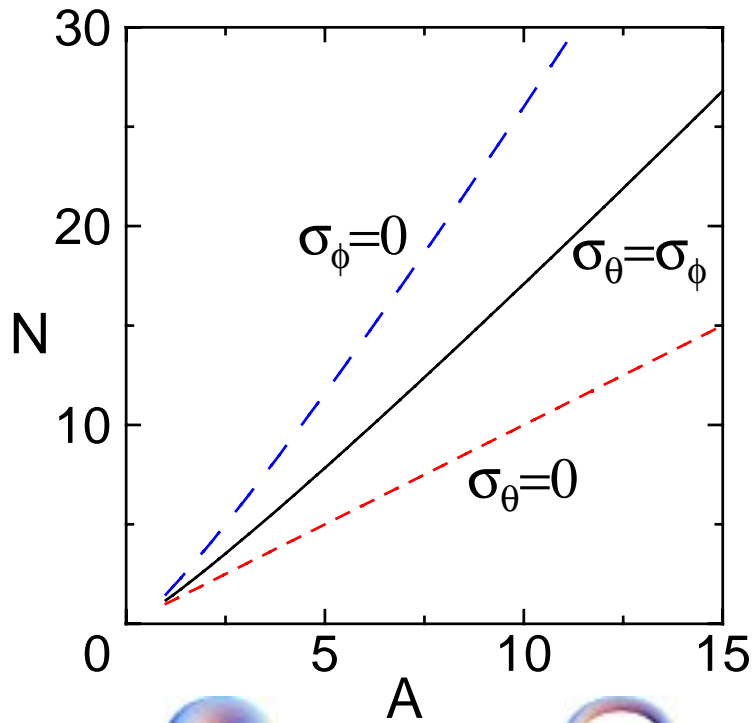
アスペクト比



$\langle \tilde{\sigma}_\theta \rangle = \langle \tilde{\sigma}_\phi \rangle = \frac{1}{2}$ がエネルギー的に最適

Virial限界条件

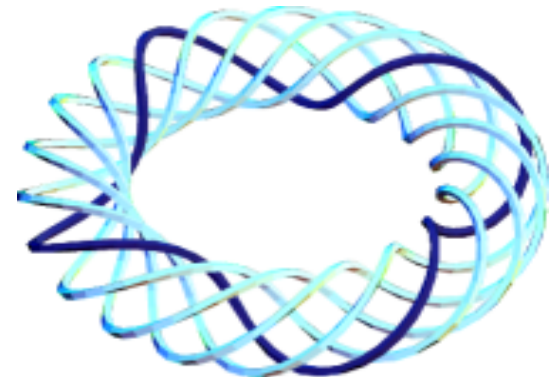
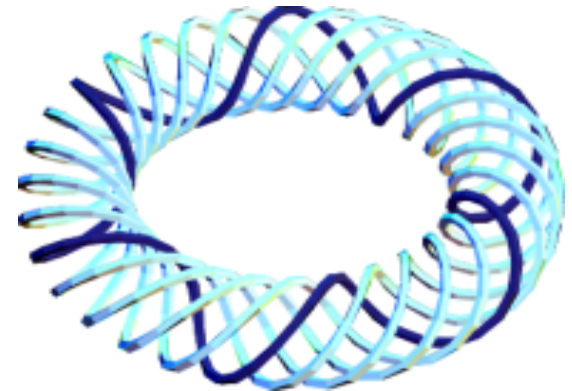
Virial限界条件等での
ピッチ数とアスペクト比の関係



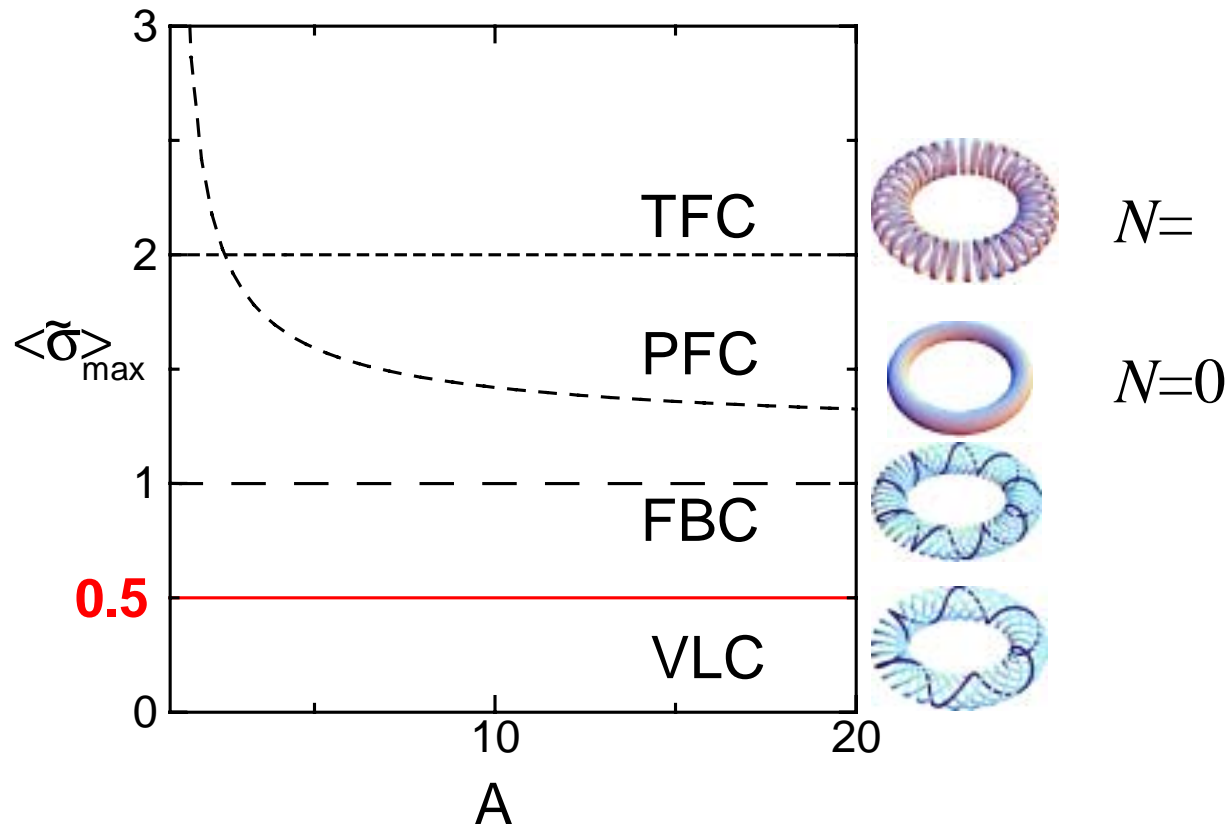
$\langle \sigma_\phi \rangle = 0$
N=9
FBC

$\langle \sigma_\phi \rangle = \langle \sigma_\theta \rangle$
N=6
VLC

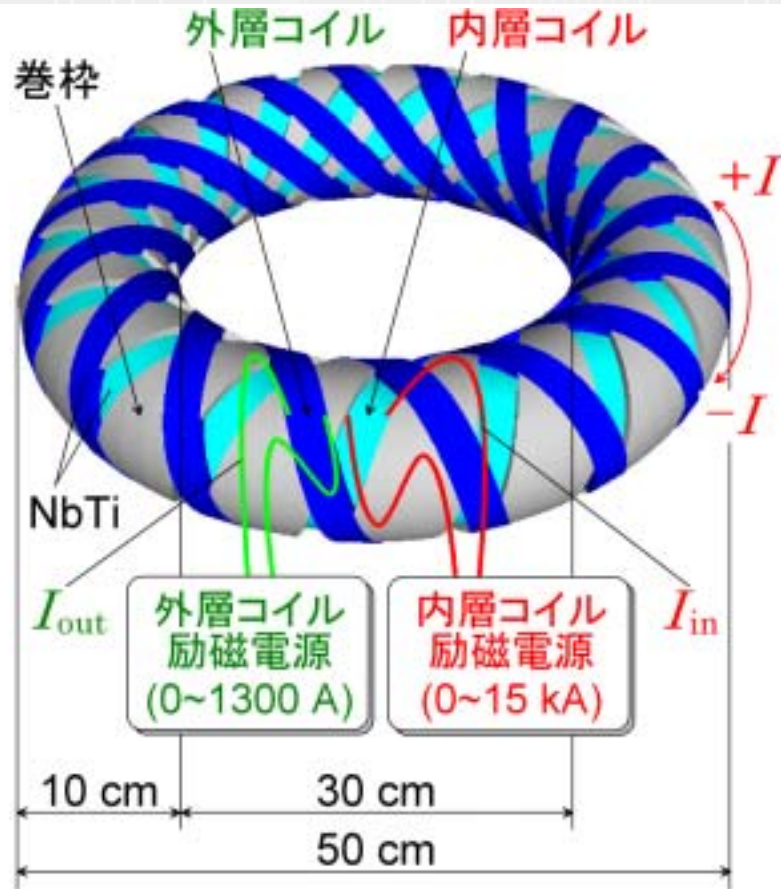
$\langle \sigma_\theta \rangle = 0$
N=4



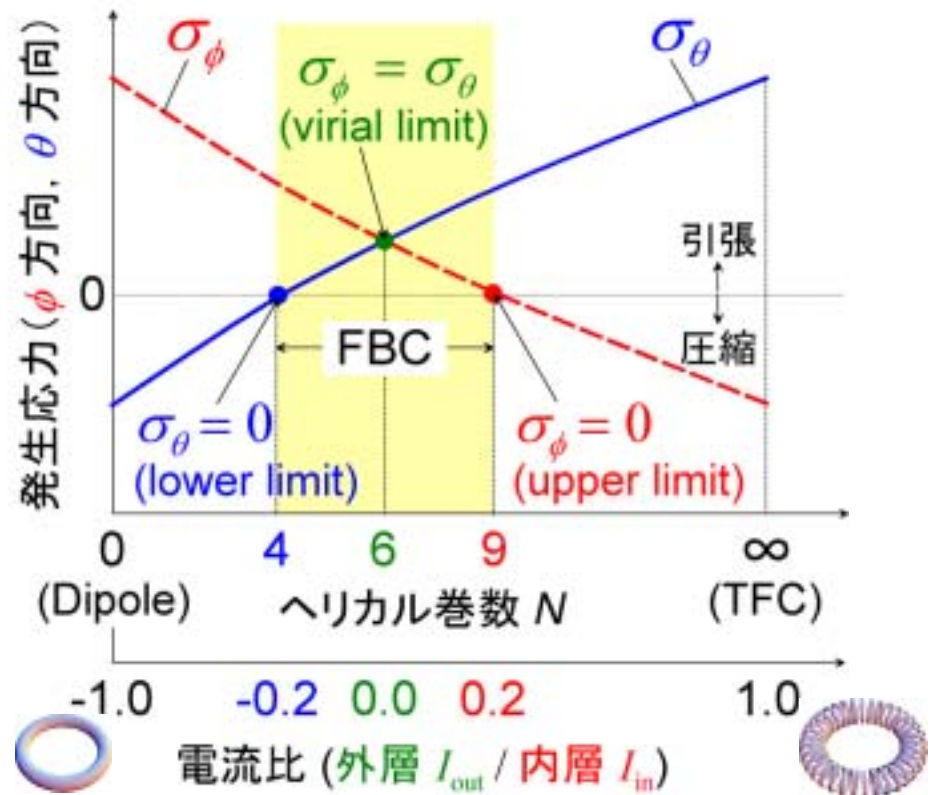
アスペクト比 $A = 4$



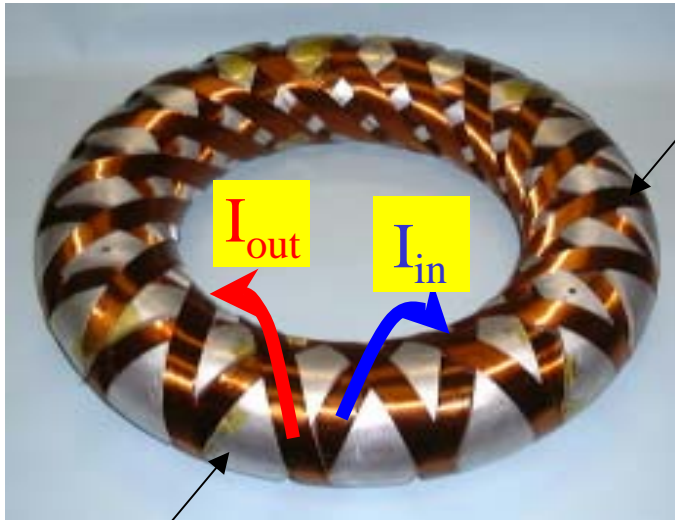
- トロイダル効果による応力分布を無視すれば、単純トロイダル磁場コイルに比べて、最大応力を1/4にすることが出来る



コイル模擬条件と発生応力の関係

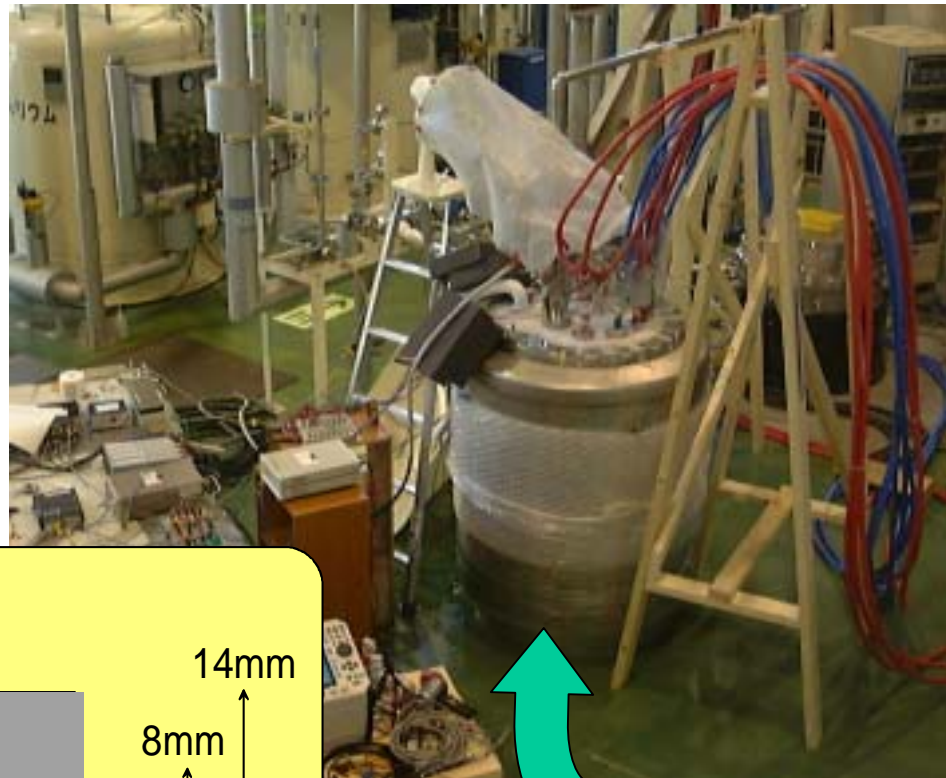


- 2つのVirial限界コイル ($N = 6$) を反対方向に巻く。
- 内層外層コイル間の電流比を変化させることで、任意のヘリカル巻数を模擬できる。



NbTi超伝導線
(3528巻)

実験装置全景

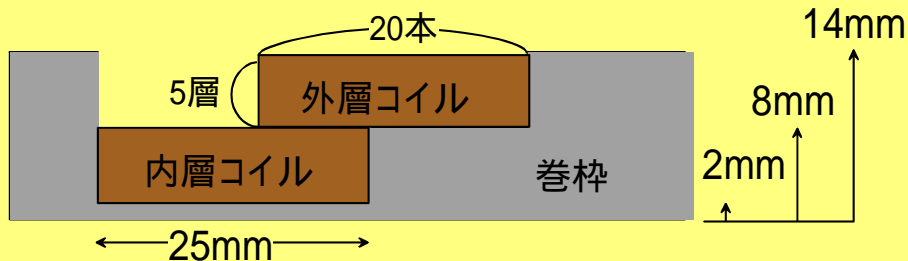


アルミ製巻き枠

計測装置

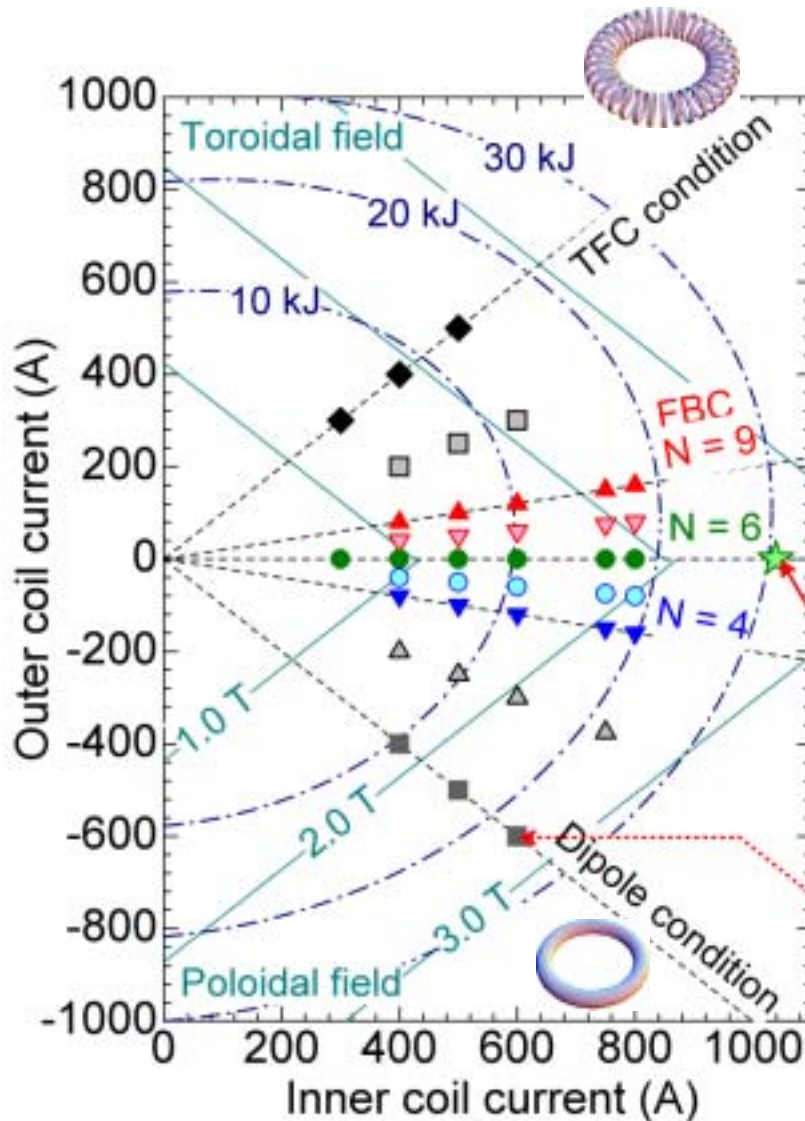
<導体軌道断面>

各層 依積みで20(19)本が5層



電源へ

液体ヘリウムデュアー
(内部にVLC実証コイル)



模擬コイルのヘリカル巻数 N

$$N = \frac{N_{\text{coil}} (I_{\text{in}} + I_{\text{out}})}{I_{\text{in}} - I_{\text{out}}} \quad (N_{\text{coil}} = 6)$$

実証実験 電流比(外層/内層)

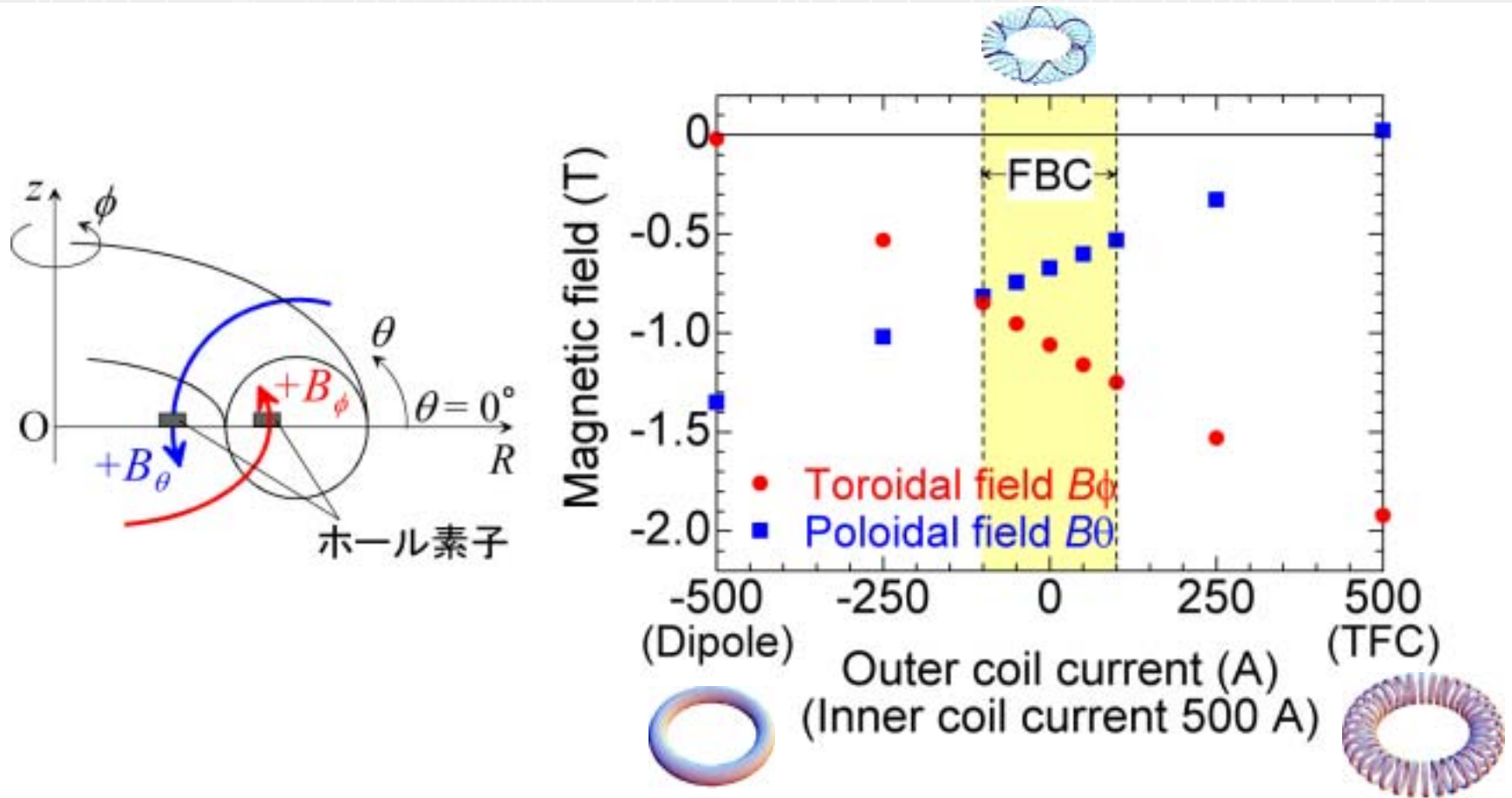
- ◆ : 1.0 (TFC), □ : 0.5,
- ▲ : 0.2 ($N = 9$), ▼ : 0.1,
- : 0.0 ($N = 6$), ○ : -0.1,
- ▼ : -0.2 ($N = 4$), △ : -0.5,
- : -1.0 (Dipole)

9つの模擬条件を検証

達成値

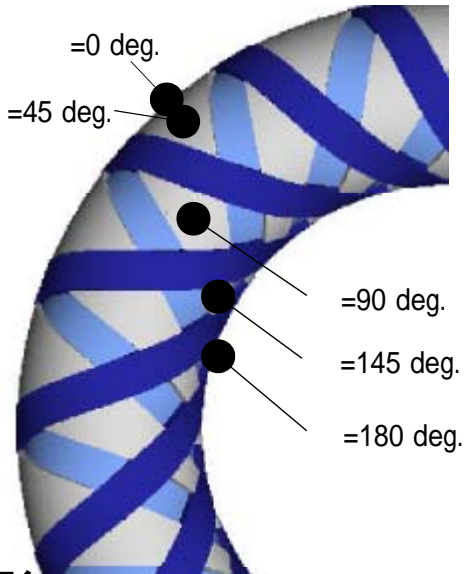
最大磁気エネルギー **31 kJ**
 応力最小化電磁力平衡コイル

最大発生磁場 **2.8 T**
 ポロイダル磁界コイル模擬



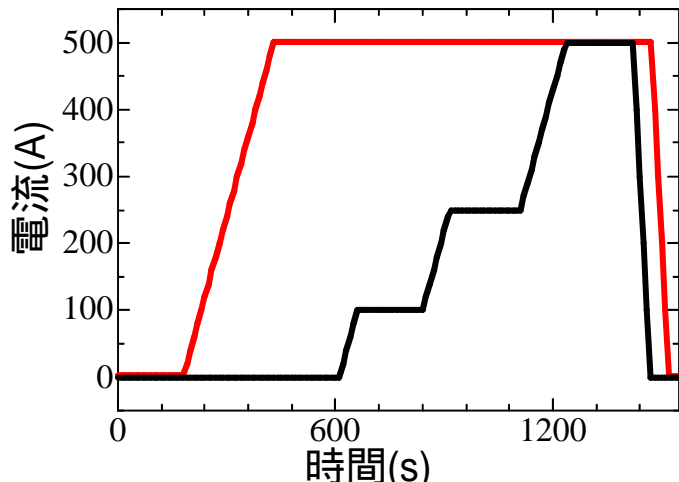
- トロイダル磁場及びポロイダル磁場の大きさは、内層外層コイル電流値の組み合わせに応じて変化している。従って、内層外層コイル間の電流比に応じて様々なコイル方式が模擬されていることが確認された。

● : ひずみゲージ貼り付け位置

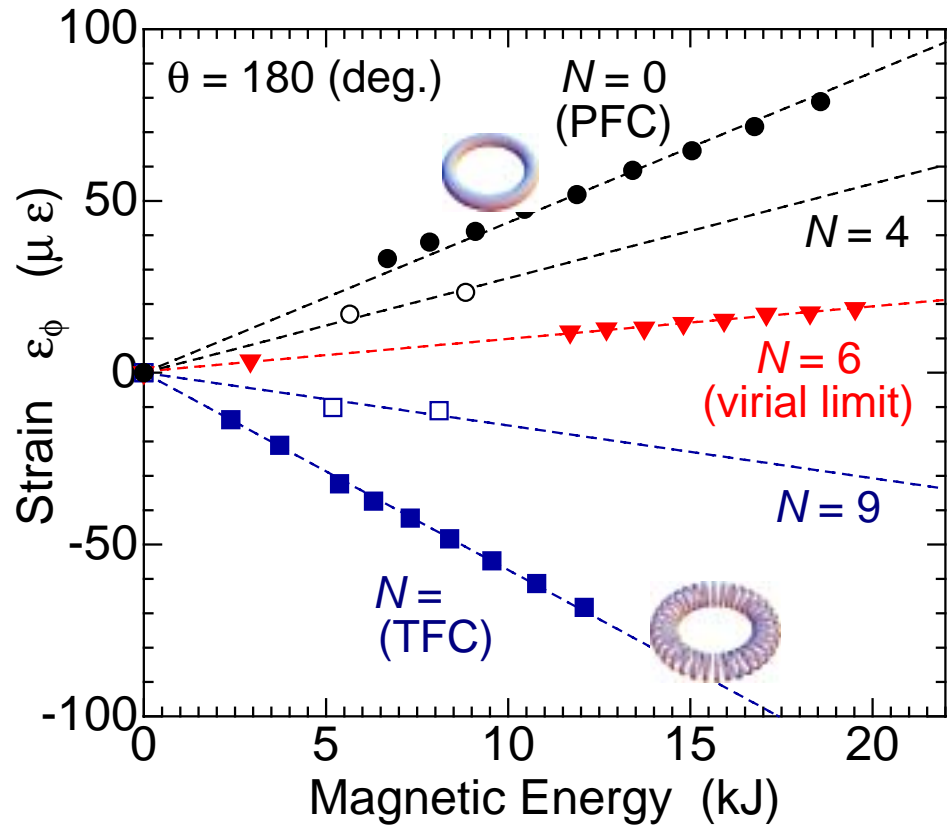


<電源波形>

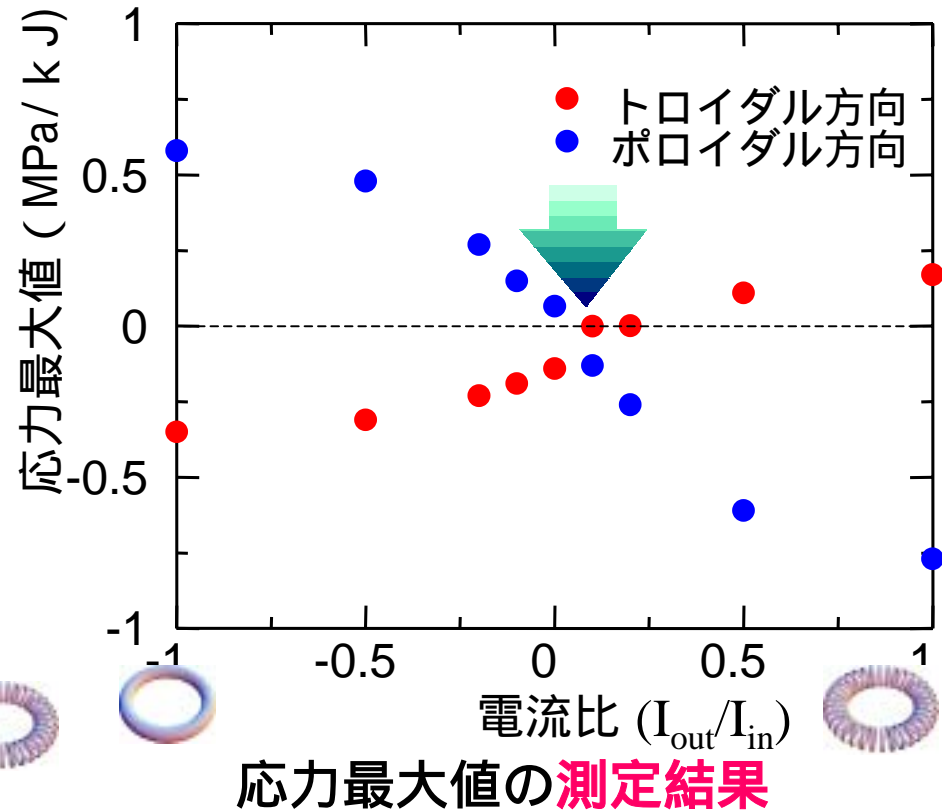
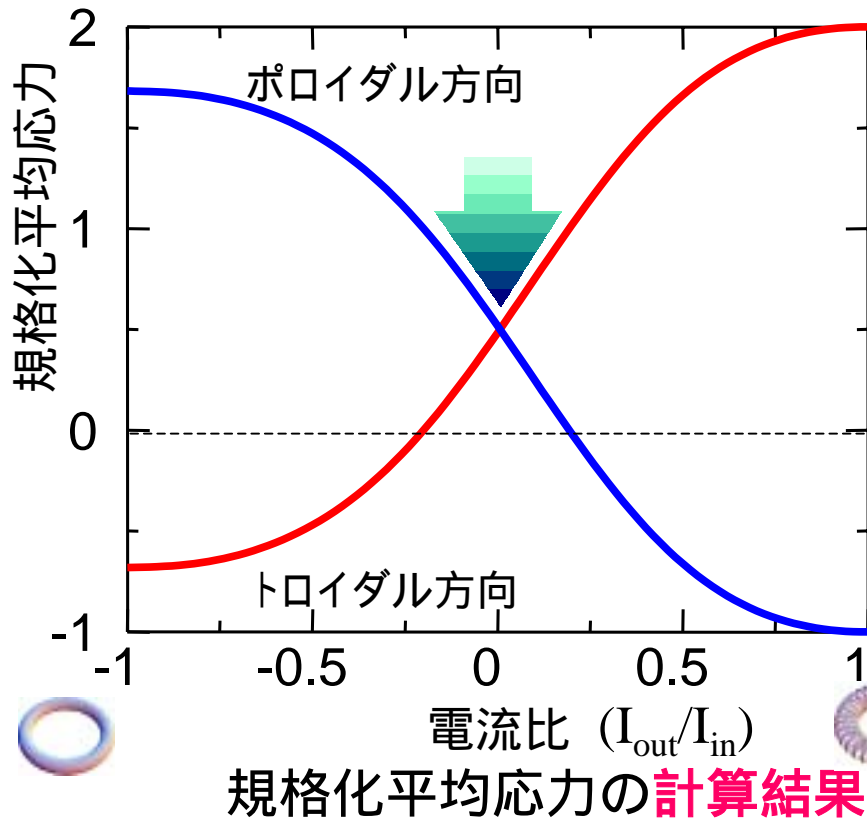
— 内層電源
— 外層電源



歪計測結果

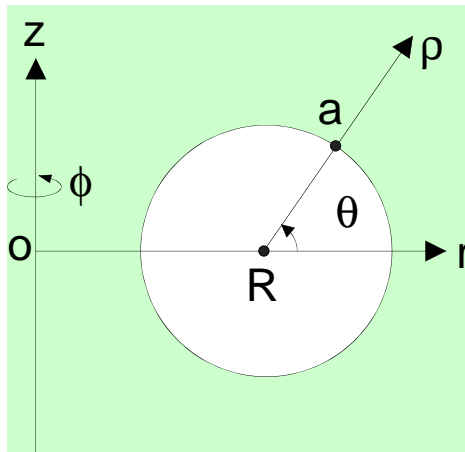


線形であるので、電磁力による歪を計測していることがわかる。



Virial限界条件で応力が最小になることが実証された。

Equilibrium of Magnetic Pressure and Stress



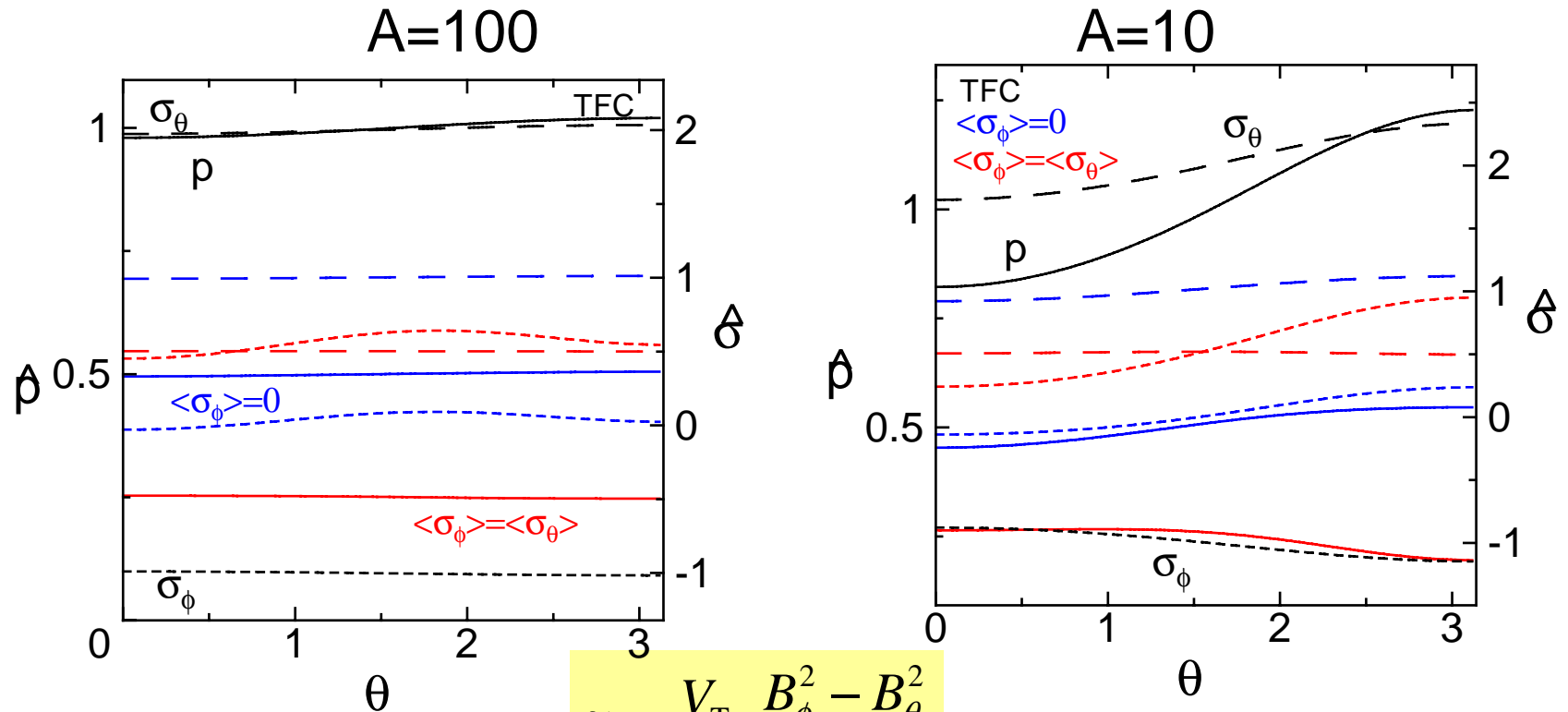
$$u(r) \equiv a \int_R^r r' p(r') dr'$$

$$T_\theta = \frac{u}{(r-R)r}$$

$$T_\phi = \frac{arp}{r-R} - \frac{u}{(r-R)^2}$$

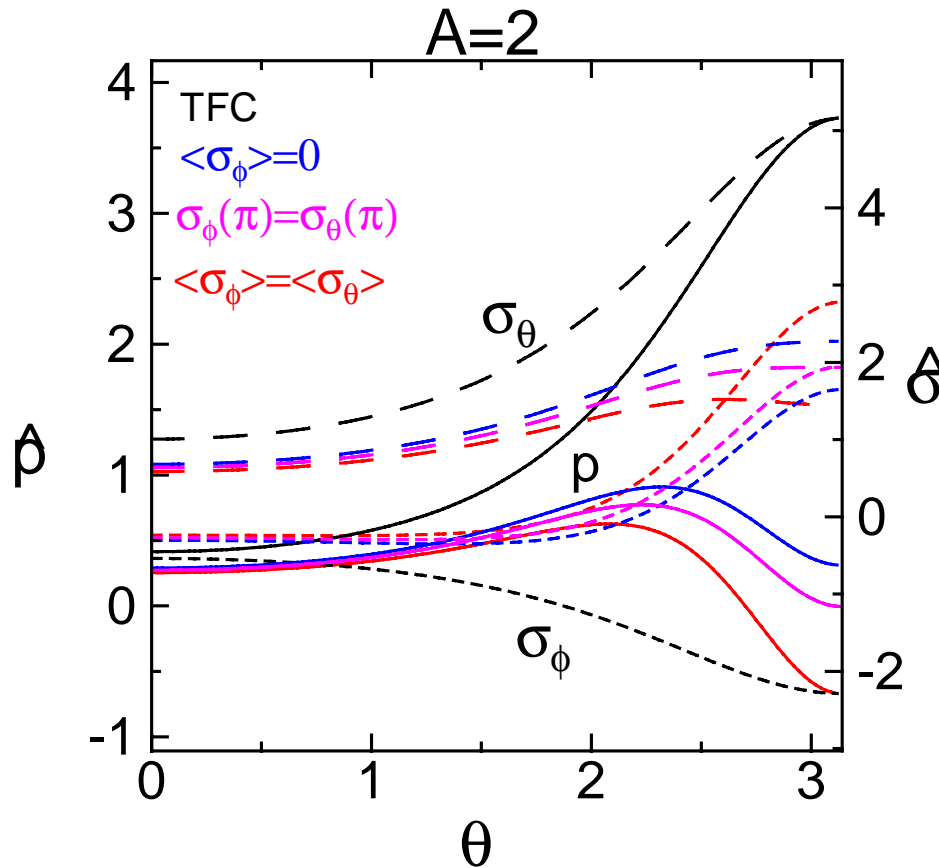
$$p \equiv \frac{B_\phi^2 - B_\theta^2}{2\mu_0}$$

- 磁気圧差が p の円断面トーラス環の応力分布は解析的に求まる



$$\tilde{p} \equiv \frac{V_T}{U_M} \frac{B_\phi^2 - B_\theta^2}{2\mu_0}$$

- A=100では、応力の分布はほとんど無い
- A=10程度で、応力の分布が現れる



- $A < 10$ では、応力分布を考慮する必要がある
- $\theta = \pi$ での応力を最小化することで応力を小さく出来る



Shell model with periodic symmetry

$$rT_\theta + (r - R)T_\phi = arp(r, \phi),$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\theta}(rT_\theta) + aT_\phi \sin \theta + inaS &= 0, \\ \frac{d}{d\theta}(rS) - aS \sin \theta + inaT_\phi &= 0. \end{aligned}$$

$$R + a \cos \theta = r,$$

where

Equilibrium Equation

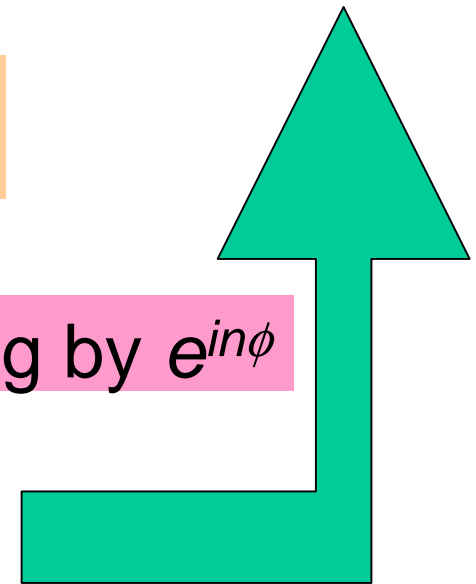
$$T_\theta \equiv \sigma_{\theta\theta}\Delta\rho, \quad T_\phi \equiv \sigma_{\phi\phi}\Delta\rho, \quad S \equiv \sigma_{\phi\theta}\Delta\rho = \sigma_{\theta\phi}\Delta\rho$$

$$p(\theta, \phi) = p_0(\theta) (1 + \alpha \sin m\theta) \cos n\phi,$$

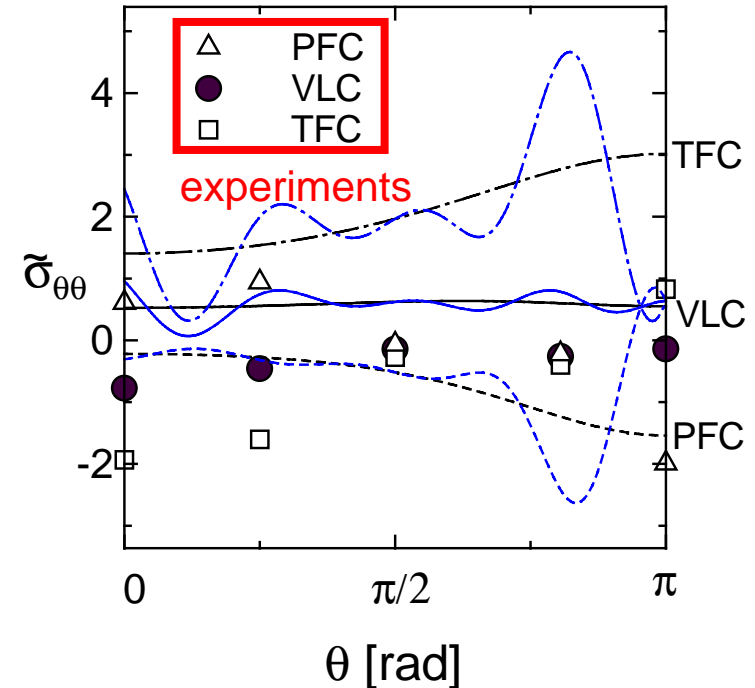
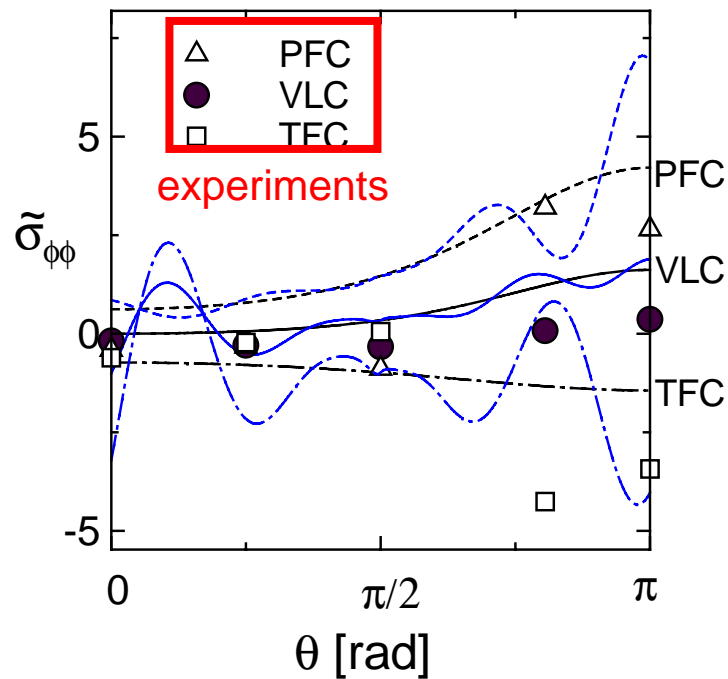
α : amplitude of mode

m, n : poloidal / toroidal mode numbers

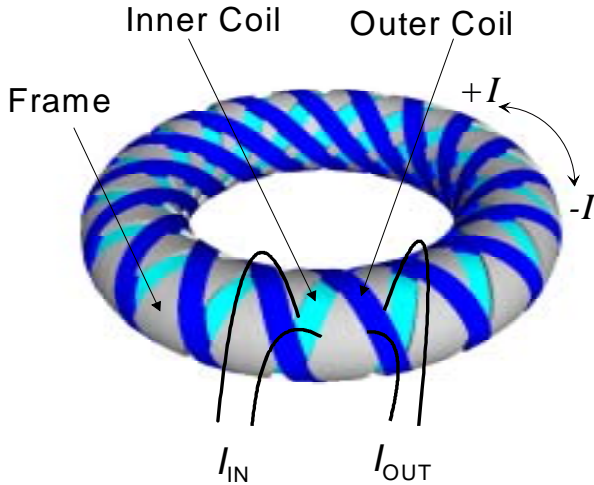
Expanding by $e^{in\phi}$



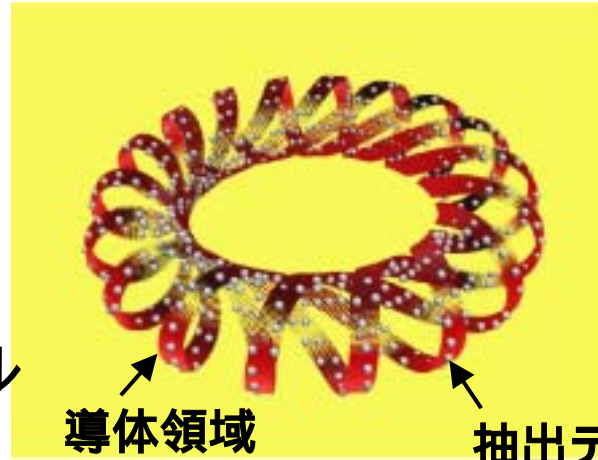
Lines: shell model with $A=4$, $\alpha=0.1$, $m=6$, $n=18$



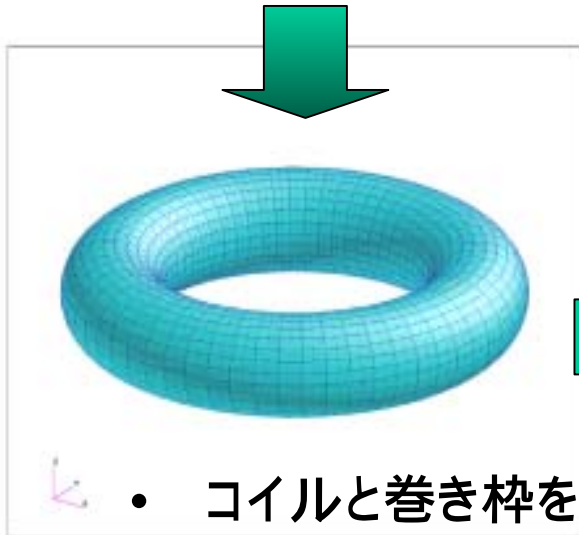
- Comparing the results of the experiments and the numerical calculations, a qualitative agreement of stress distribution between the calculation and the experiment is obtained in the toroidal direction, while discrepancies of stress in the poloidal direction are not negligible.



外層コイル
通電時

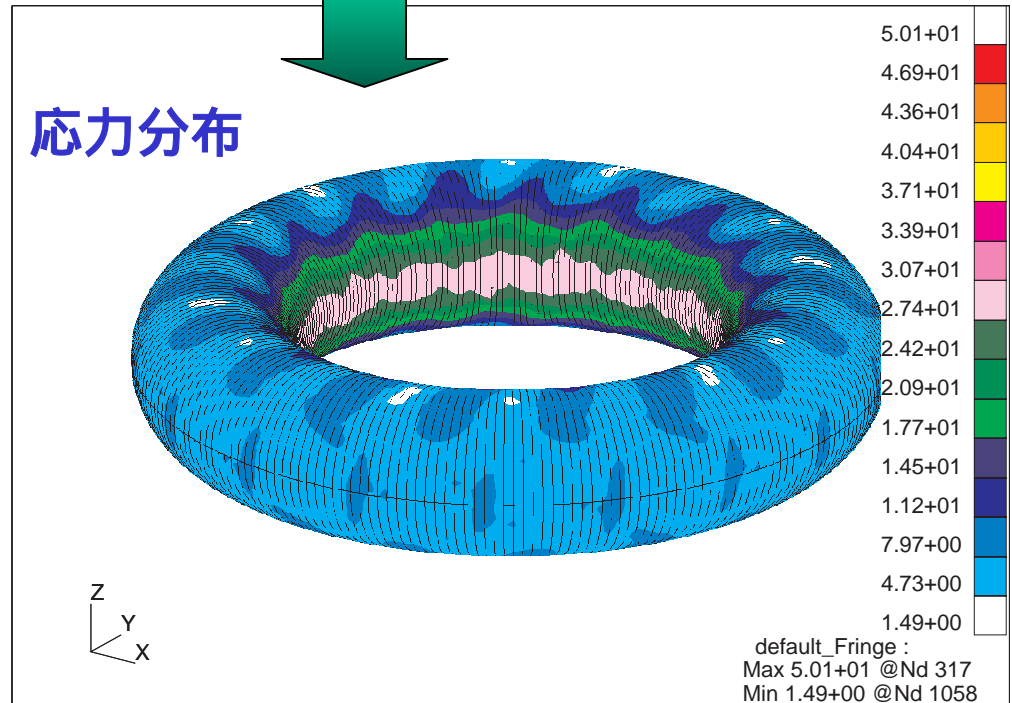


コイル部分に
電磁力を印加



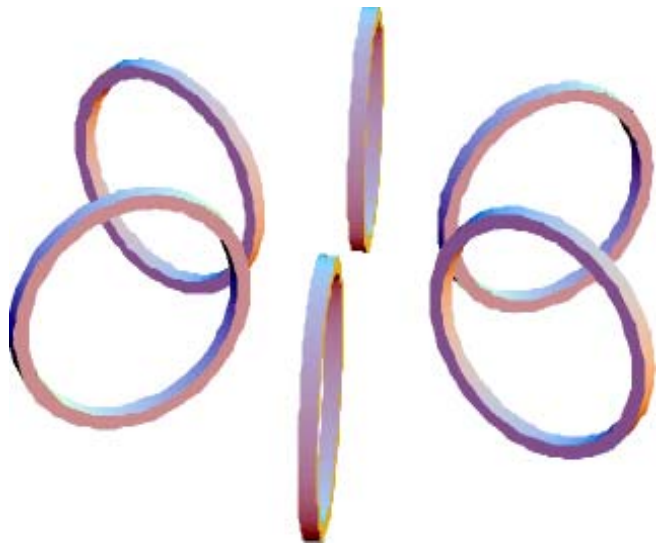
- コイルと巻き枠を
一体としたモデル

応力分布



- Virial定理を用いて応力最小の条件を導き、Virial限界コイル(VLC)の概念を考案した。このコイルは、単純トロイダル磁場コイルに比べて4倍のエネルギーを貯えることが出来る。
- この概念を実証するために、任意のピッチのコイルを模擬できるトーラス型超伝導コイルを製作した。
- VLCが応力最小のコイルであることを実験で実証した。
- 大型装置設計のために、有限要素法などを用いて応力分布解析を行っている。

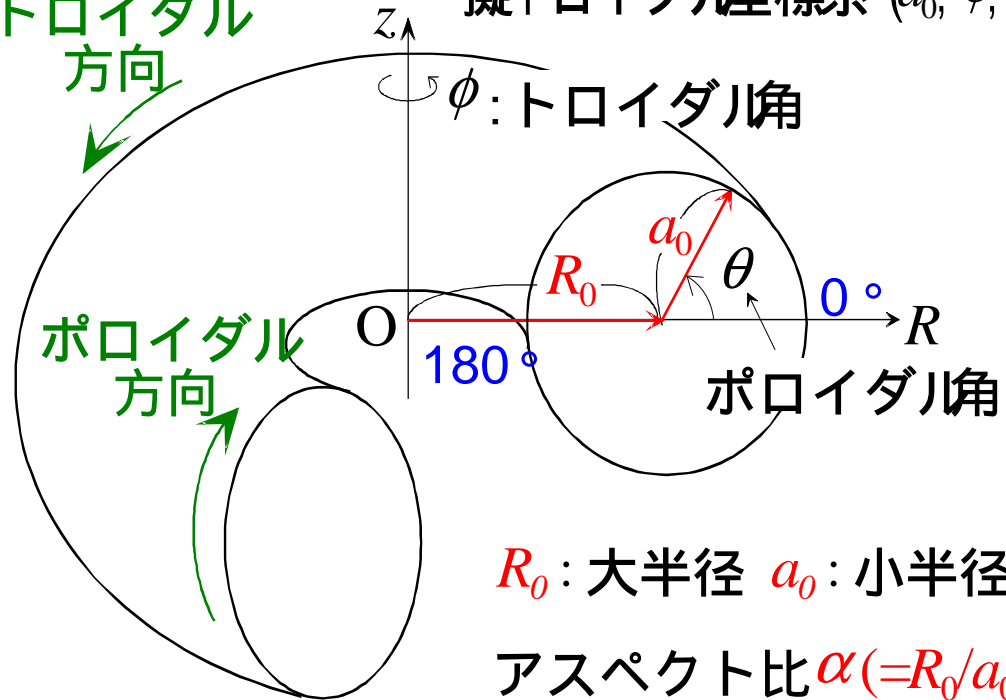
トロイダル磁界コイル



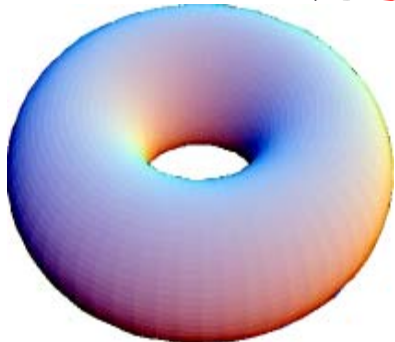
トロイダル
方向

ポロイダル
方向

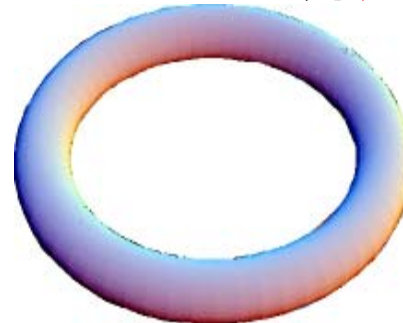
擬トロイダル座標系 (a_0, ϕ, θ)



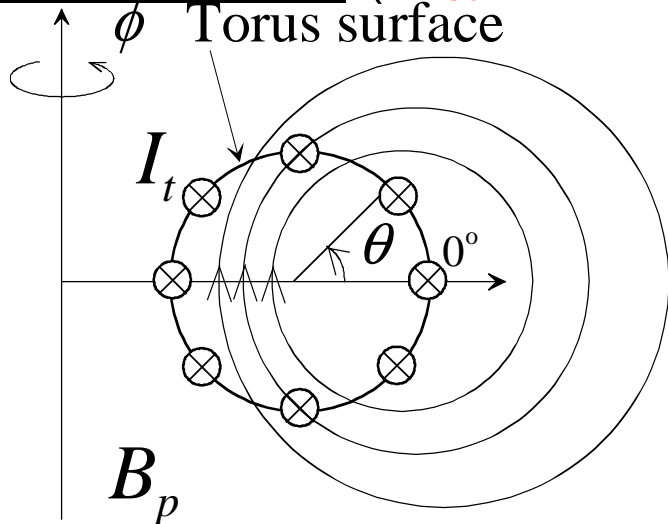
アスペクト比 **小**



アスペクト比 **大**



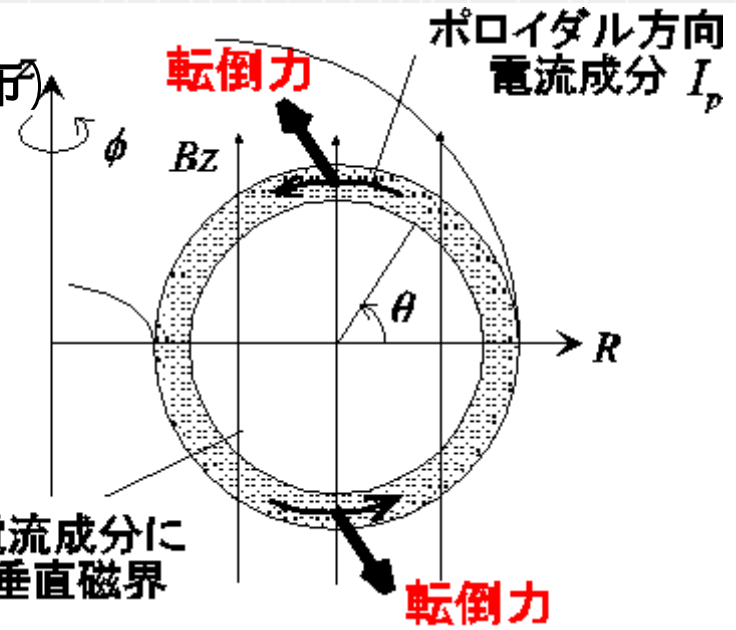
単純ヘリカルコイル (一様なトロイダル方向電流分布)



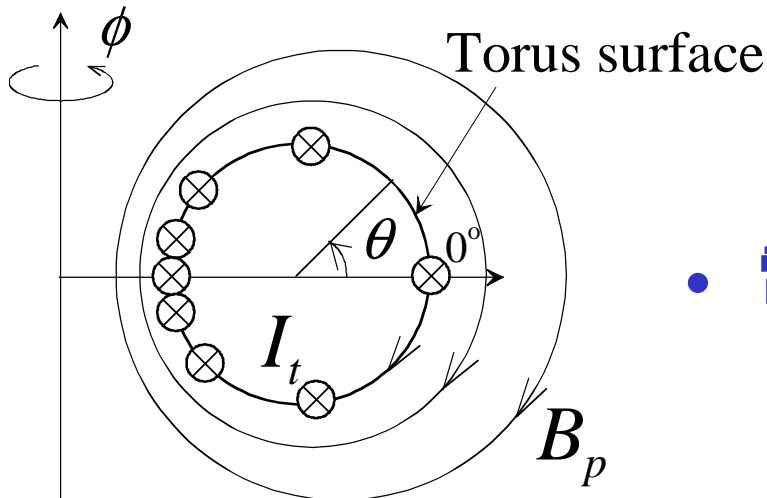
転倒力の発生



トロイダル方向電流成分によって発生する垂直磁界

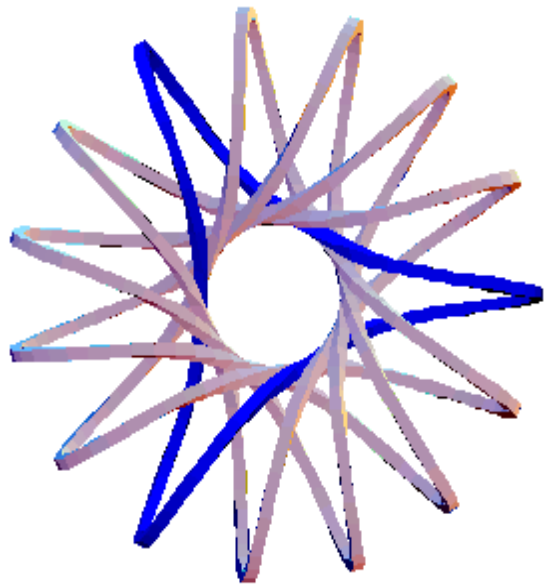


電磁力平衡コイル (コイル位置を磁気面とするトロイダル方向電流分布)

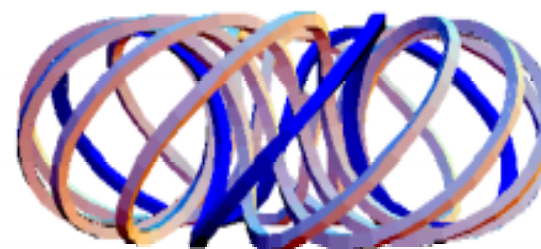
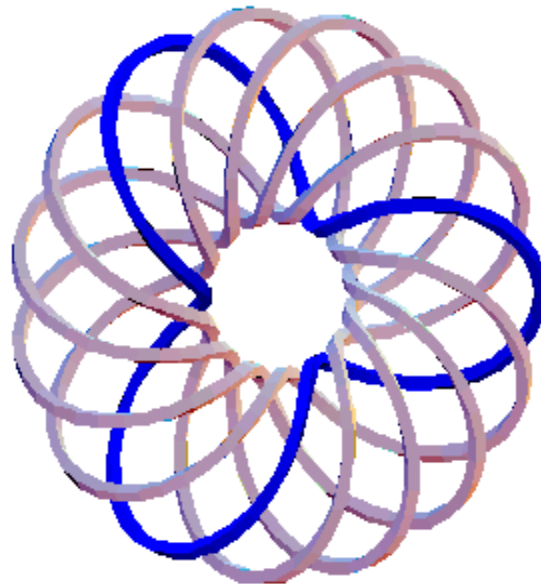


- 電流面を磁力線が横切らない

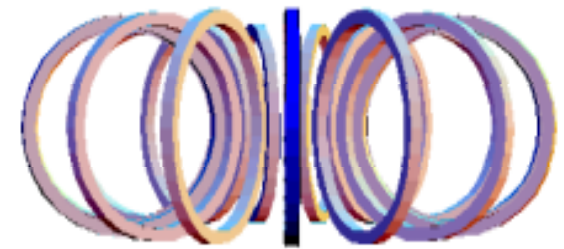
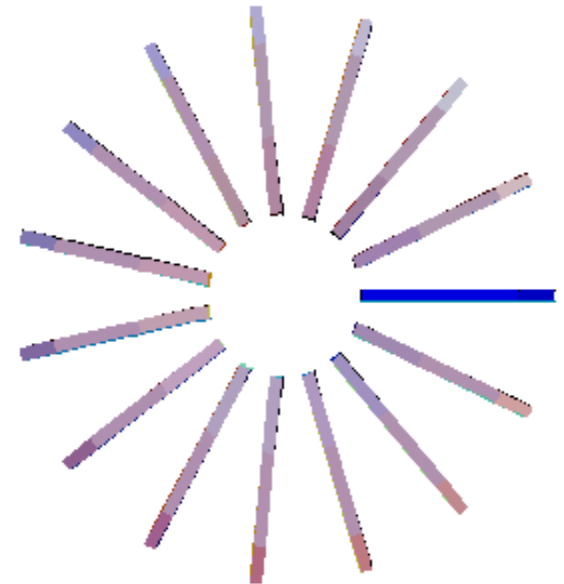
変調ヘリカル巻線
(FBC, SBC)



単純ヘリカル巻線
(HC)

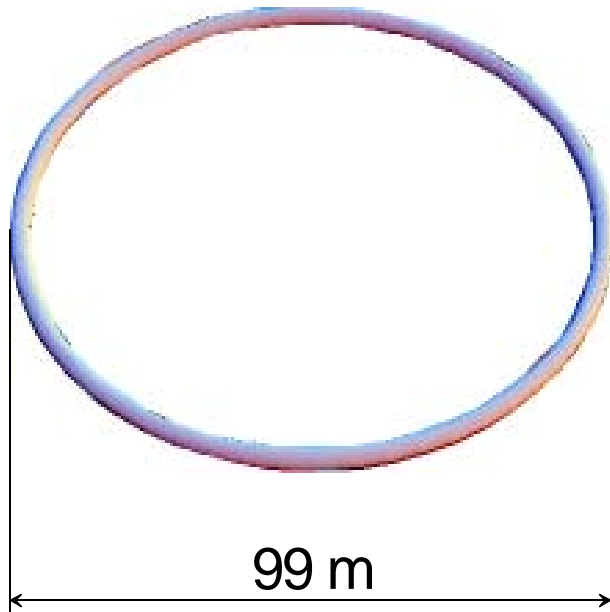


トロイダル磁界コイル
(TFC)

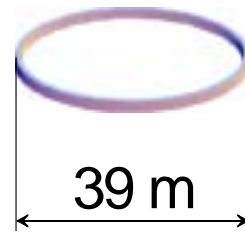


設計条件 蓄積エネルギー **50 MWh (180 GJ)**
最大経験磁場 **15 T** コイル高さ **3 m** コイル電流値 **100 kA**

各コイル方式のコイル外直径の比較



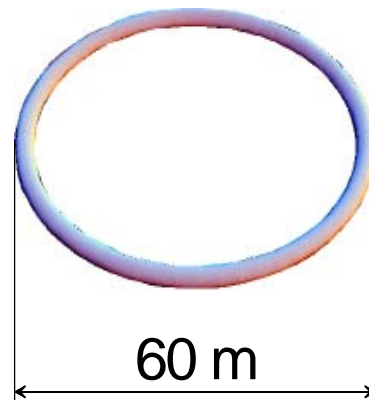
(a) トロイダル磁界コイル (TFC)



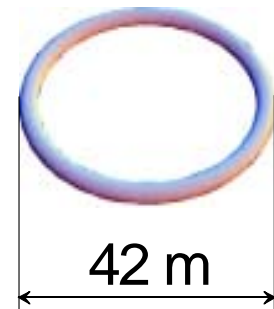
(b) ソレノイドコイル (solenoid)



(d) 応力平衡コイル (SBC)



(c) 電磁力平衡コイル (FBC)



(e) ビリアル限界コイル (VLC)

Equilibrium of Electromagnetic Force and Stress



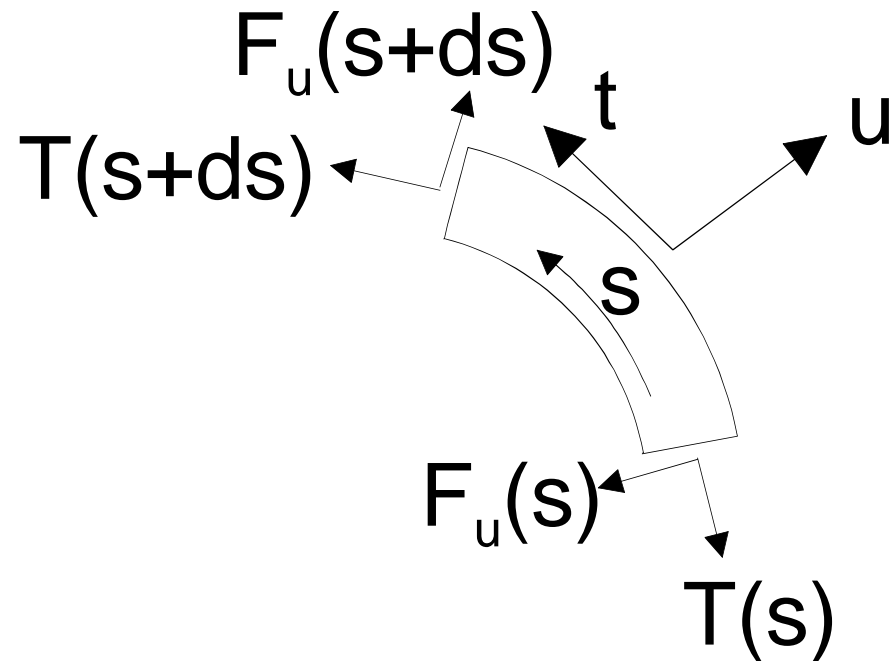
$$\frac{dT}{ds} + \frac{F_u}{R} = 0$$

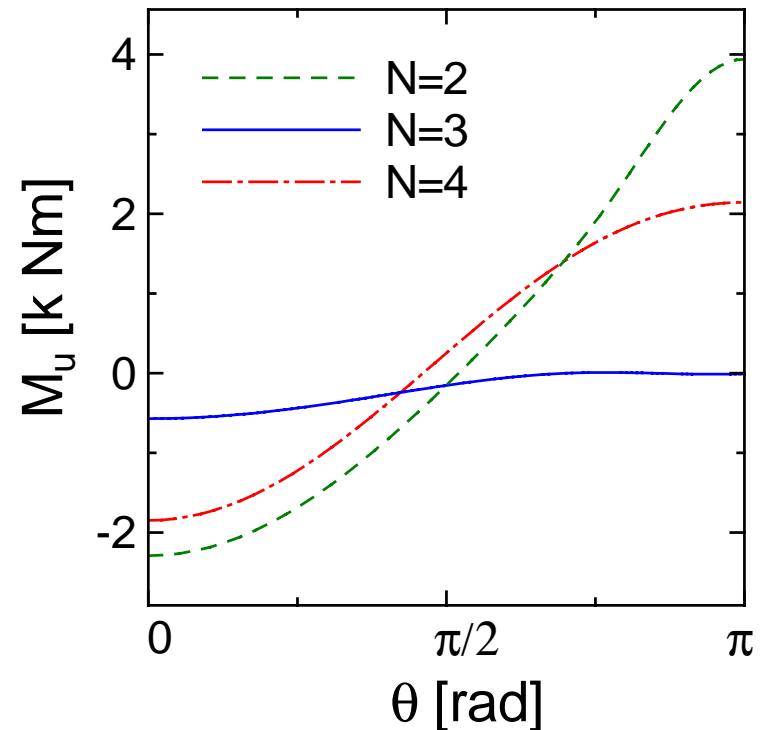
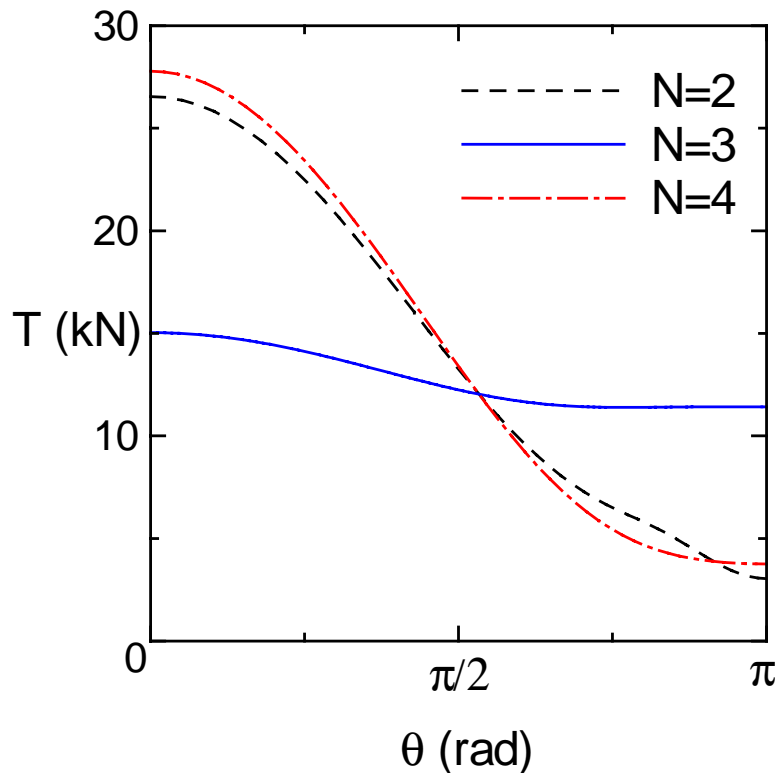
$$\frac{dF_u}{ds} + \frac{T}{R} = f_u$$

T : 張力, F : せん断力

R : 曲率半径, f : 電磁力

s : コイルの長さ座標





- ケーブルが太い場合は、曲げ応力 (曲げモーメントに比例) も重要。
- ピッチ数3のコイル(VLC)は張力、曲げモーメント分布ともに平坦