

高エネルギー加速器セミナー

OH0'22

超伝導電磁石技術

こちら側



公益財団法人  
高エネルギー加速器科学研究奨励会



高エネルギー加速器研究機構



連携大学院  
サマー・オープン・フェスティバル

## 粒子検出器用超伝導電磁石

2022/9/8

KEK 榎田康博

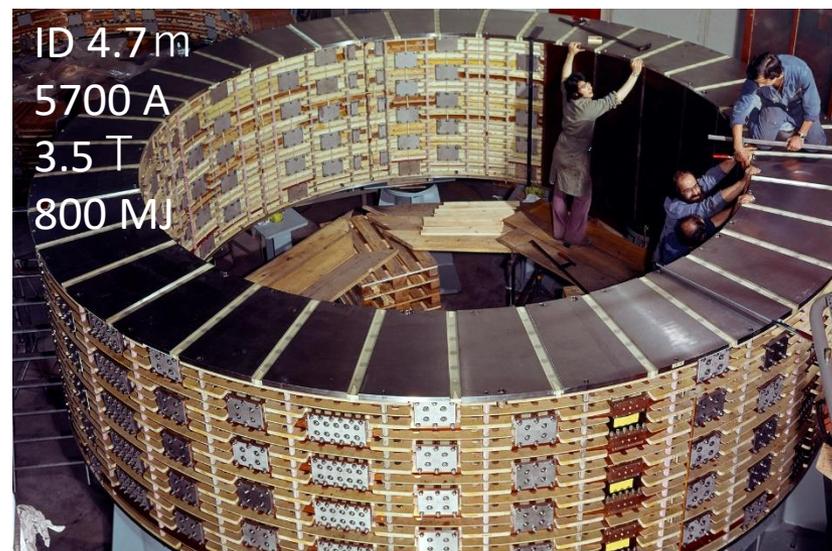
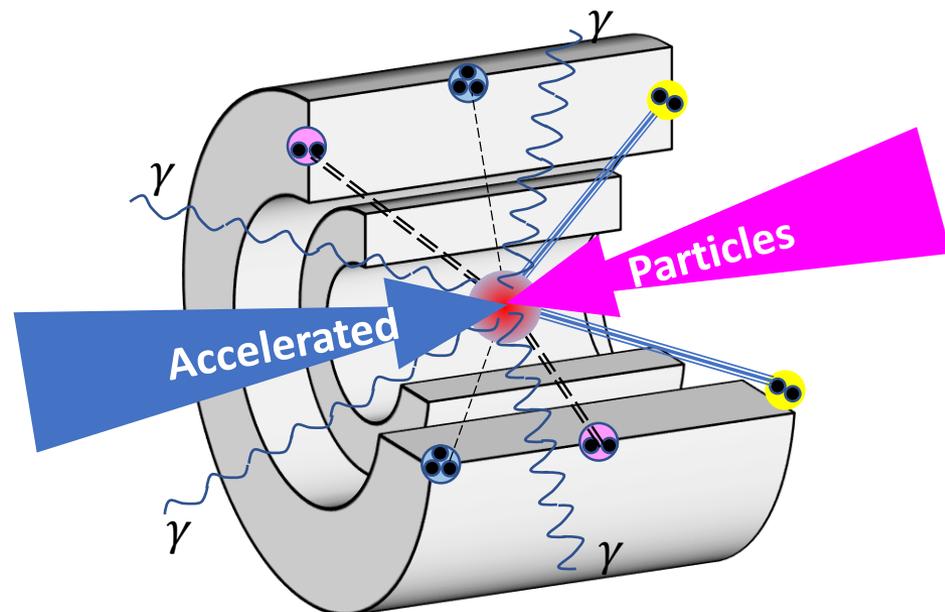
# テキスト訂正

- 8-15ページ 式 (23)

$$v_{\phi} = \frac{j_e}{\gamma C} \left( \frac{L_0 \theta_s}{\theta_t - \theta_0} \right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow v_{\phi} = \frac{j_e}{\gamma C} \left( \frac{L_0 \theta_s}{\theta_s - \theta_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

# はじめに

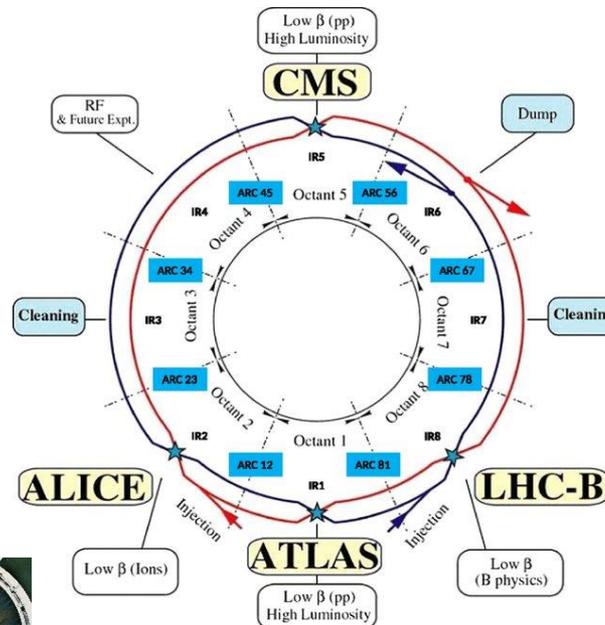
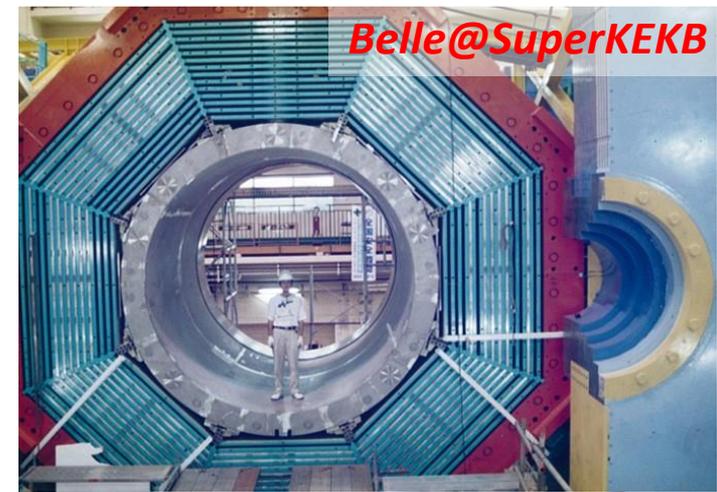
- 新しい素粒子の発見には
  - 高いエネルギー粒子の衝突によるエネルギー塊から素粒子を生成する（加速器）。
  - 様々な素粒子のシャワーを観測（粒子検出器）。
- 磁場を使った検出器は有用。
  - 荷電粒子の運動量
  - 電荷の極性（物質-反物質）
- 磁場1 Tを超える広い磁場空間は超伝導磁石で実現。
  - 始まりは、水素泡箱のために磁場空間を生成。



BEBC SC coil  
From CERN Courier December 2005

# はじめに

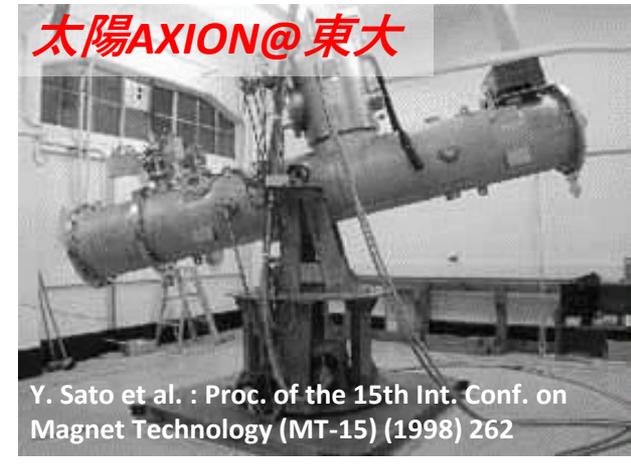
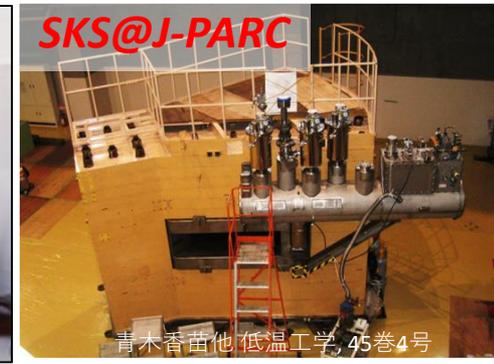
- 検出器用SC磁石の展開
  - EF領域の加速器実験向けに巨大な超伝導磁石が建設。



<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2007/sepect/kek3.html>

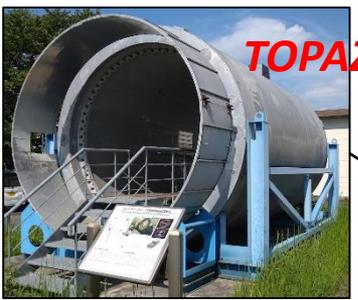
# はじめに

- 検出器用SC磁石の展開
  - EF領域の加速器実験向けに巨大な超伝導磁石が建設。
  - その他の加速器実験にも採用。小型冷凍機の発達も後押し。
  - 宇宙線観測などフィールド実験にも永久電流モードによって励磁されたSC磁石が採用。
- **本講義は検出器用SC磁石を特徴づける技術要素の解説をする。**



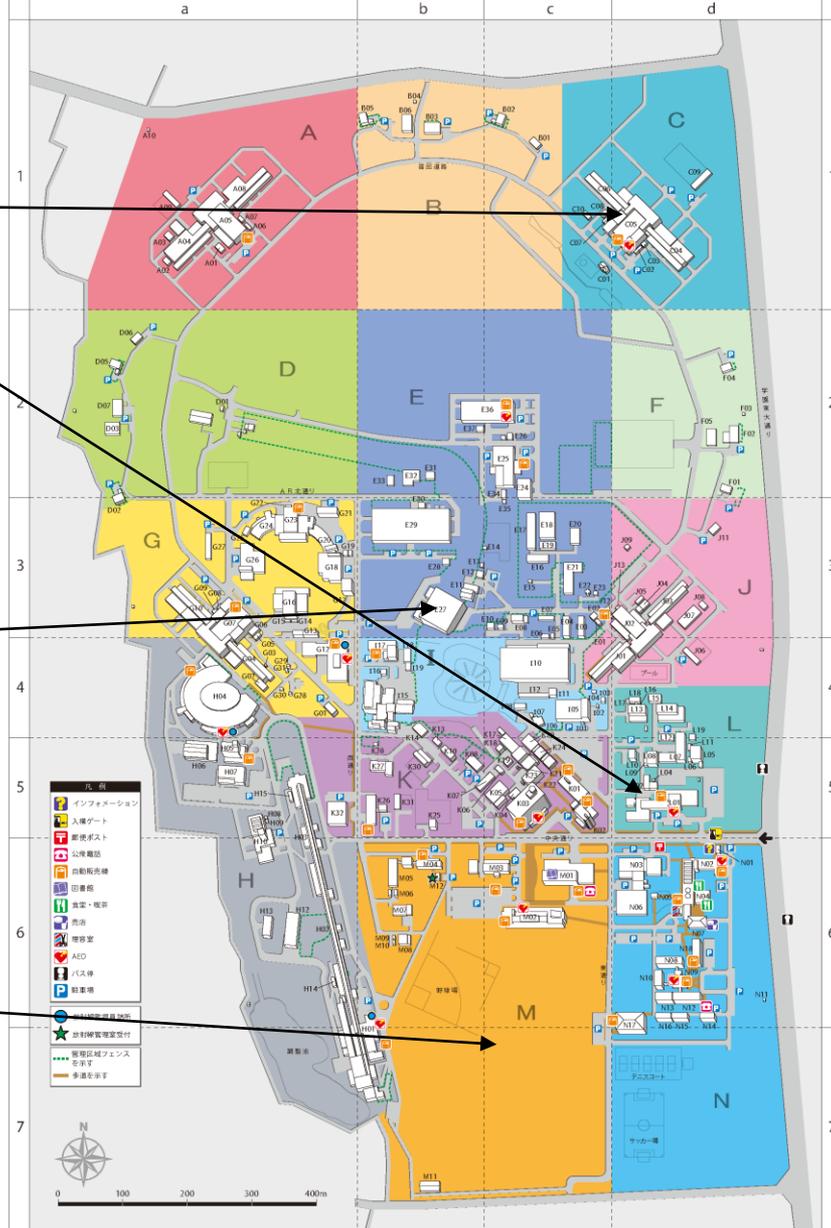
# はじめに

KEKにて稼働中、保管中、展示中、放置中の検出器用SC磁石



## 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構案内図

HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION



ZONE-A		
No.	棟名	
A05 a-1	日光実験棟	
ZONE-C		
No.	棟名	
C05 d-1	新測定実験棟	
ZONE-E		
No.	棟名	
E21 c-3	放射線試験測定棟	
E25 c-2	高圧電子ビーム試験施設	
E27 b-3	北カウンスール	
E29 b-3	実験加算器実験棟	
E36 b-3	加速器制御室実験棟	
ZONE-G		
No.	棟名	
G07 a-3	富士実験棟	
G12 a-4	荷電粒子線センター棟	
G16 a-3	PF-A測定実験棟	
G18 a-3	PF-A測定実験棟	
G20 a-3	PF-A測定実験棟	
G23 a-3	PF-A測定実験棟	
G24 a-3	PF-A測定実験棟	
G26 a-3	PF-A測定実験棟	
ZONE-H		
No.	棟名	
H01 b-7	荷電粒子線センター棟	
H02 a-3,6,7	電子電子対実験棟	
H04 a-4	PF実験棟	
H05 a-5	PF実験棟	
H07 a-5	PF実験棟	
ZONE-I		
No.	棟名	
I10 c-4	放射線実験棟	
I15 b-4	先端計測実験棟	
I17 b-4	先端計測実験棟	
ZONE-J		
No.	棟名	
J02 d-3	大陸実験棟	
ZONE-K		
No.	棟名	
K01 c-5	1号館	
K02 c-5	2号館	
K03 c-5	1号館	
K26 b-5	観望室実験棟	
K32 a-5	クライエータ実験棟	
ZONE-L		
No.	棟名	
L01 d-5	管理棟	
L05 d-5	第4低層棟	
L07 d-5	第2低層棟	
L08 d-5	第3低層棟	
L10 d-5	第1低層棟	
L13 d-4	第1工作棟	
L14 d-4	第2工作棟	
L15 d-4	第3工作棟	
ZONE-M		
No.	棟名	
M01 c-6	研究本部	
M02 c-6	4号館	
M04 b-6	放射線管理棟	
M05 b-6	化学実験棟	
ZONE-N		
No.	棟名	
N01 d-6	インフォメーションセンター	
N02 d-6	国際交流センター	
N03 d-6	計量棟	
N04 d-6	高圧	
N06 d-6	計量棟	
N07 d-6	観望室	
N08 d-6	国際共同研究施設2号館	
N09 d-6	国際共同研究施設3号館	
N10 d-6	国際共同研究施設4号館	
N12 d-6	国際共同研究施設5号館	
N13 d-6	国際共同研究施設6号館	
N14 d-6	国際共同研究施設7号館	
N15 d-6	国際共同研究施設8号館	
N16 d-6	国際共同研究施設9号館	
N18 d-6	国際共同研究施設10号館	
機能別一覧		
No.	棟名	
N04 d-6	食堂	
N02 d-6	ICCコミュニティセンター	
N07 d-6	高圧	
N17 d-6	体育館	
N01 d-6	インフォメーション/観望センター	
M01 c-6	図書室	
I15 b-4	産業医室・健康相談室	
M12 b-6	放射線管理受付け	
N02 d-6	ユーザーズオフィス	
K29 c-5	物品管理センター	
M01 c-6	小ホール	
d-4	フェリス	
-	b-6	野球場

# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

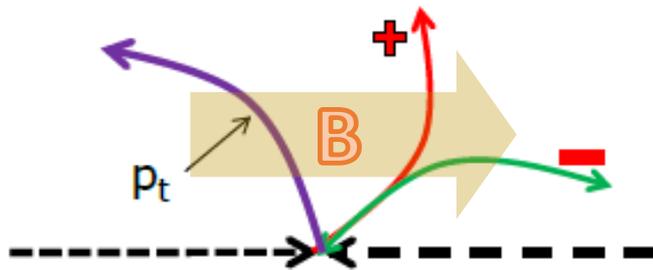
# マグネットスペクトロメーターの基礎(1)

## • どのように粒子のシャワーを分析する？

- 飛跡の追跡
- エネルギーの測定byカロリメーター
- 電荷の極性in磁場
- 運動量in磁場

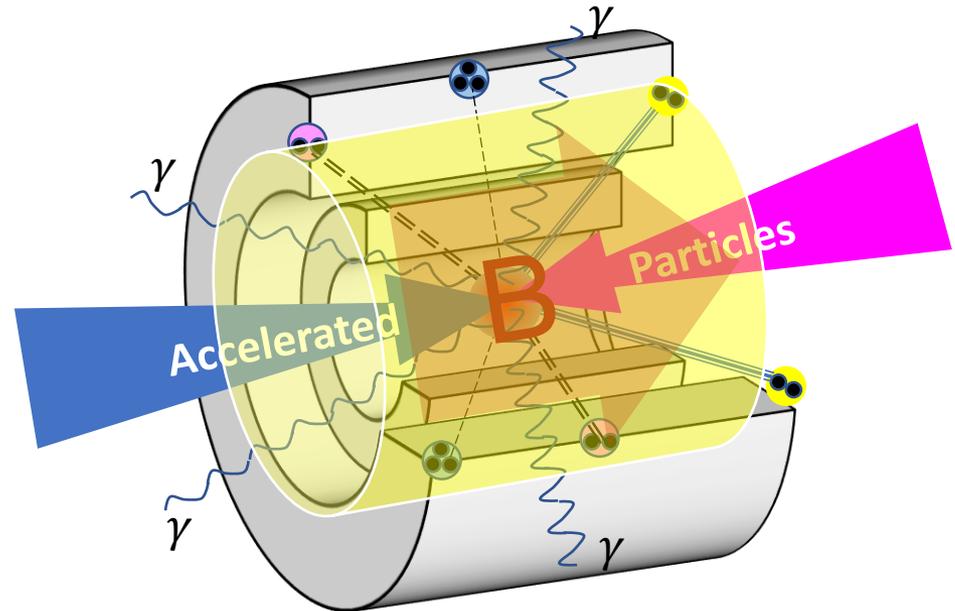
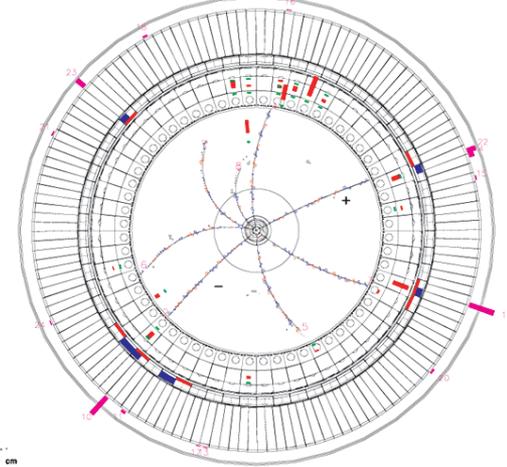
## • 検出器磁石は粒子を分光する。

- 左旋回 > 正電荷粒子
- 右旋回 > 負電荷
- 曲率 > 運動量



BELLE

Exp 15 Run 581 Form 0 Event 196307  
Eter 0.00 Eter 0.00 Fri Nov 2 08:21:08 2001  
Trig0 0 Detector 0 Mag0 0 Spinel 1.50 Dipfer 5.10  
Prot(ch) 9.7 Elot(gm) 0.7 SVD-M 0 COC-M 0 KLM-M 0



# マグネットスペクトロメーターの基礎(2)

- 荷電粒子の磁場中の飛跡

$$F = \dot{\mathbf{p}} = m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \dot{\mathbf{v}} = \frac{q}{m}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$R = \frac{p_T}{|q|B}, \quad \sin \theta = \frac{p_T}{p}$$

$p_T$ : 磁場に垂直な運動量、 $p_T/|q|$ : *Rigidity*

ここで運動量の単位を加速器物理でよく用いられる [GeV/c] を利用できるようにする。

電荷量も電荷素量単位として  $\hat{q} = q/e$

$$p_T = 0.3|\hat{q}|BR$$

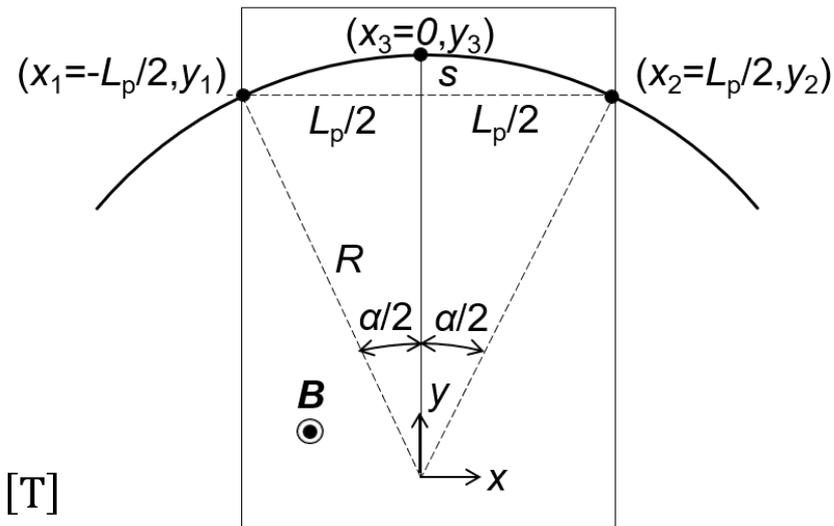
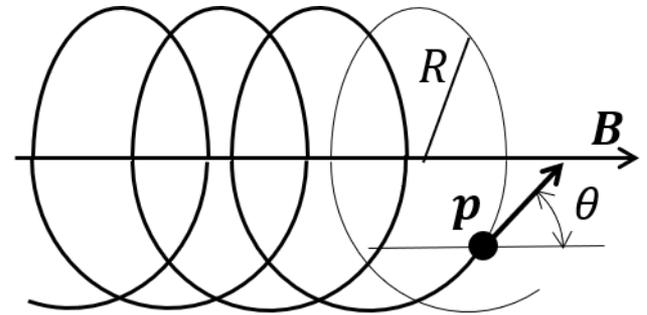
- 小さな偏向角  $\alpha$  での曲率半径  $R$  とサジッタ  $s$  とアーム  $L_p$  の関係

$$s \approx \frac{1}{8} \frac{L_p^2}{R}$$

- サジッタの測定から運動量へ

$$p_T = \frac{0.3 L_p^2 B}{8 s} \quad \text{ここで } p_T [\text{GeV}/c], L_p [\text{m}], s [\text{m}], B [\text{T}]$$

サジッタ  $s$  を小さくすること、 $B$  が大きくなることに限界があるとすると、より高い運動量の粒子の識別には大きな  $L_p^2$  が必要になる。大きな磁場空間が必要。



$p_T$ (GeV/c)	$s$ (mm)
1000	0.037
100	0.37
10	3.7
1	37

$$B = 1 \text{ T}$$

$$L_p = 1 \text{ m}$$

# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
- 2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ**
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

# マグネットスペクトロメータのタイプ(1)

## 典型的な構成(磁石の形状で分類)

ソレノイド型及びダイポール型、トロイダル型

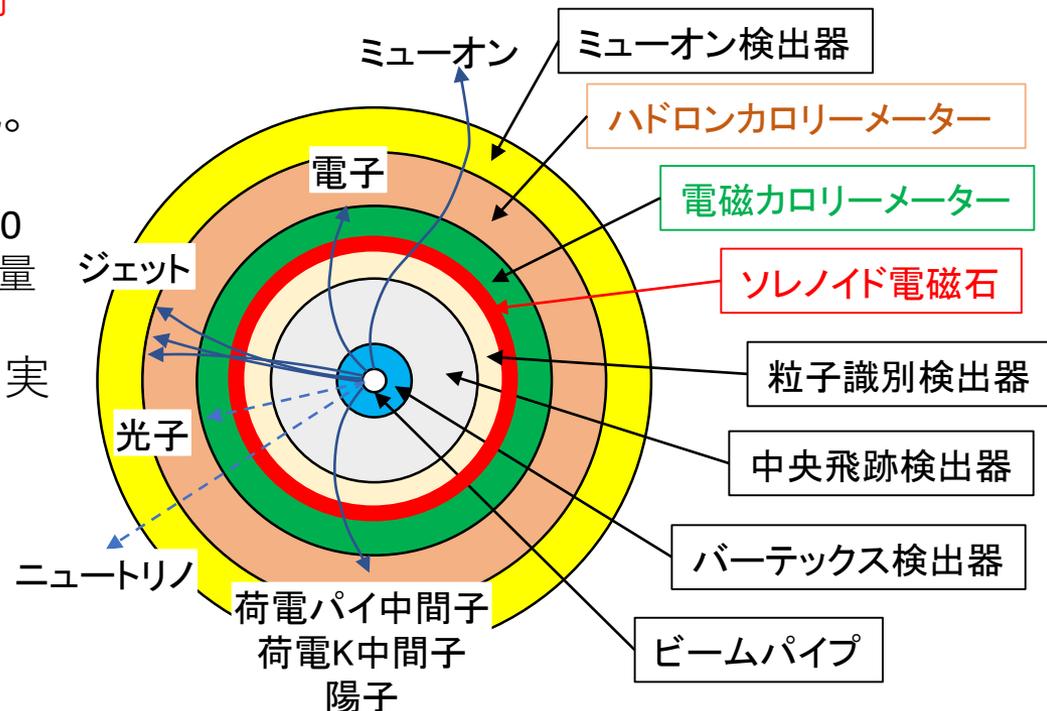
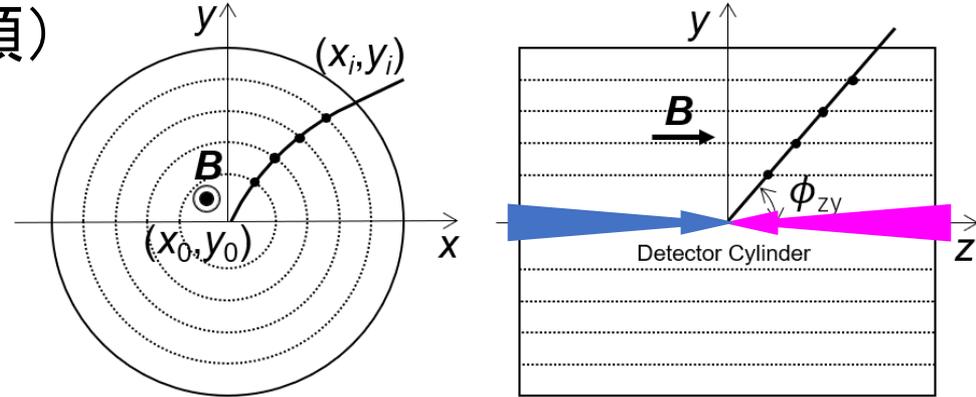
### ソレノイド型

- 入射ビームとソレノイド磁場が平行。
- ビーム衝突点がソレノイド磁石の中心。
- 衝突点周囲をトラッカーが囲み、偏向する生成粒子の飛跡や2次崩壊の様子を全方位 ( $4\pi$ ) で追跡。
- 鉄ヨークで囲まれ、磁気回路を形成。

### 重量大。

全長43 m, 全高22 mのATLAS総重量 (7,000 トン) が全長22 m, 全高15 mのCMS 総重量 (14,000 トン) の約1/2。

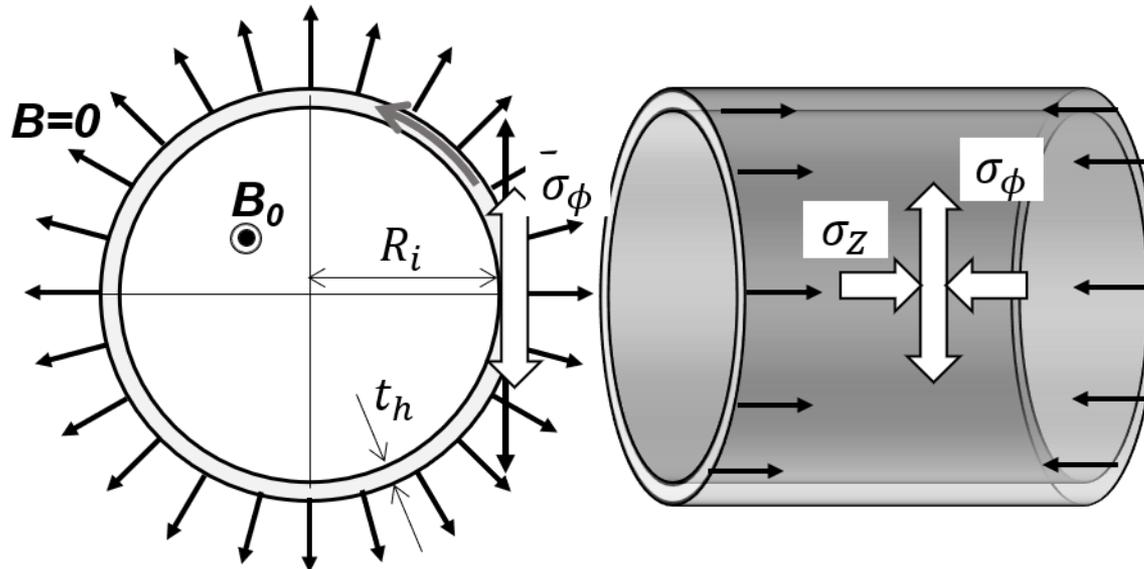
- 多くの衝突型加速器 (コライダー) 実験で採用
- VENUS, TOPAZ, AMY, Belle
- CDF, D0
- ALEPH, DELPHI, ATLAS CS, CMS



# マグネットスペクトロメータのタイプ(2)

## ソレノイドコイルの特徴

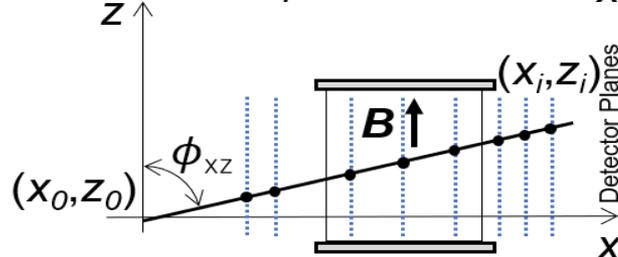
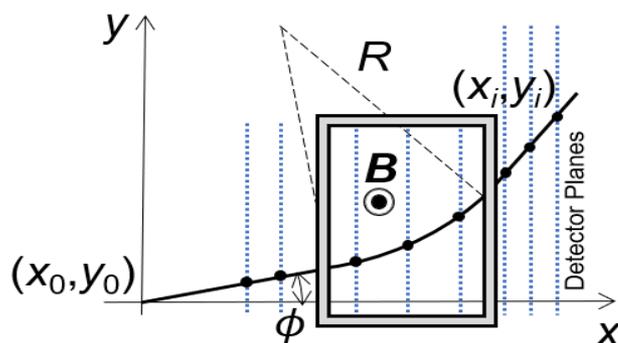
- コイル巻線中の最大磁場 $B_{peak}$ は中心磁場 $B_0$ の1.2倍程度。トロイダルダルは $B_{peak}/B_0 \approx \sim 4$ 程度になる。
- 円筒状の巻線はシンプルで自立構造。
- 電磁力はフープ力と軸圧縮力となり、基本的にコイル内部で力は閉じている。
- コイルは薄く、軽く、透明性を持たせることができる。
- ビーム軸方向に近い粒子に対しては感度が落ちる。



# マグネットスペクトロメータのタイプ(3)

## ダイポール型(フォワード型とも言われる)

- 固定実験標的を使用する実験で主に採用
- 固定標的の前方にダイポールマグネットが配置され、入射ビームとは垂直方向の磁場領域を生成。
- 前方に出てくる粒子に限定
- $B_{max}/B_0 > 2$
- 磁石や検出器は床配置。

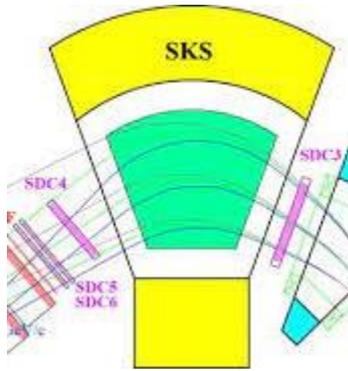
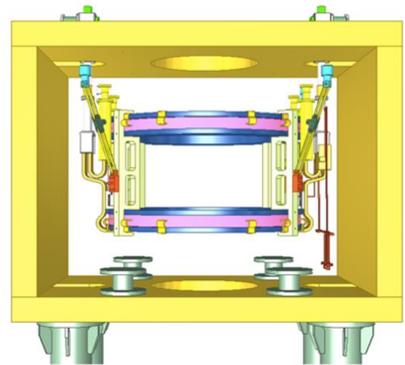


## ダイポールコイルの特徴

- 2コイル間の電磁力や鉄ヨークとの引力など電磁力がコイル内にとどまらないので付加構造が必要。
- 立体角を広げるため扇型や鞍型コイルとすることもありますが形状を維持するために補強構造が必要
- 有効磁場空間の磁場分布は磁極鉄の影響大。



Hyperon Spectrometer @ J-PARC



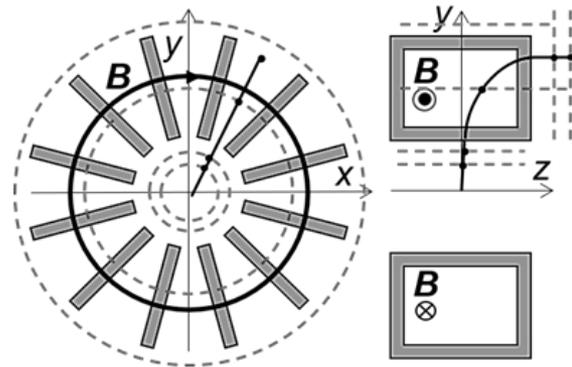
SC. Kaon Spectrineter @ J-PARC



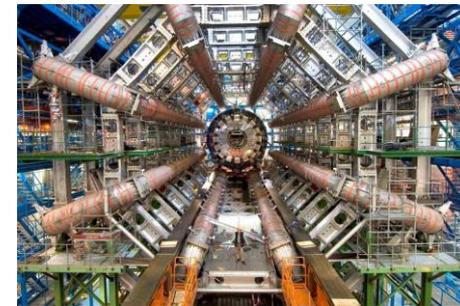
# マグネットスペクトロメータのタイプ(4)

## トロイダル型

- ビーム軸と垂直方向に飛翔する粒子を大立体角で測定する。
- 標的や衝突点そのものや直近への磁場の印加は難しい。標的や入射ビームラインに磁場をかけず、大立体角で粒子検出をしたい場合に適する。
- 衝突点周辺はソレノイド磁場で、遠方はトロイダルによって大きな磁場空間を創出している実例もある。



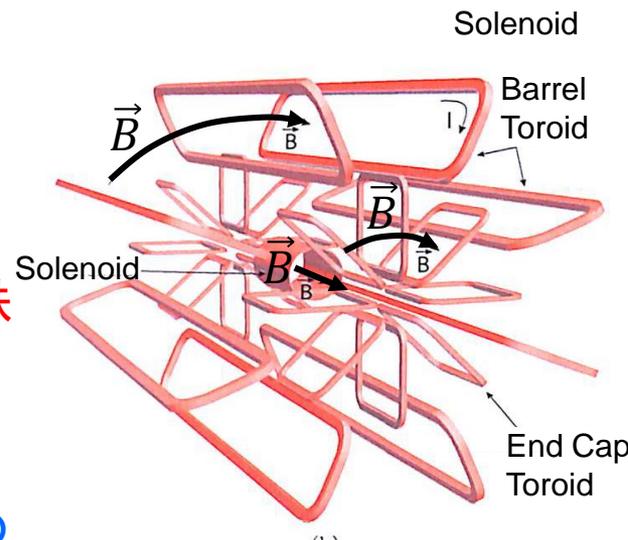
ATLAS Barrel Toroid



ATLAS Endcap Toroid

## トロイダルコイルの特徴

- コイルだけで磁気回路が形成され鉄ヨークが不要。
- トロイダル磁場は外周に行くほど下がりが均一度が低い。
- 電磁力はコイル内部に留まらないので、強固な付加構造が必要となる。



# 検出器用磁石の特徴(要求)

---

- 広い室温磁場空間 $BL_0^2$ の確保、大口径のコイル。
- 粒子散乱最小化、物質量の最小化。薄肉ソレノイドタイプでは特に重要。
- 無いが如く、寸法最小化。コイルへのサービスライン(電流、冷媒)も。
- 内部検出器の支持構造の一部となる。
- 1台限り、バックアップ無。検出器群に埋もれてアクセス不可。堅牢性と冗長性。安全率。
- 磁場の高さはせいぜい5 T。4.5 K冷却のNbTi線。

特に断らない限り薄肉ソレノイドタイプを前提として講義をすすめる。

# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. **指標E/M比**
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

# 低物質質量を目指すコイルと指標：E/M比(1)

- 大きな磁場空間をできる限り少ない物質質量で生成。
- 評価する指標：

$$E/M \text{ 比} = \frac{\text{蓄積エネルギー}}{\text{コイル質量}} [kJ/kg]$$

コイル質量 = コイル巻線 + 電磁力支持構造 (サポートシリンダー)  
+ 冷却構造 (液体ヘリウム容器)

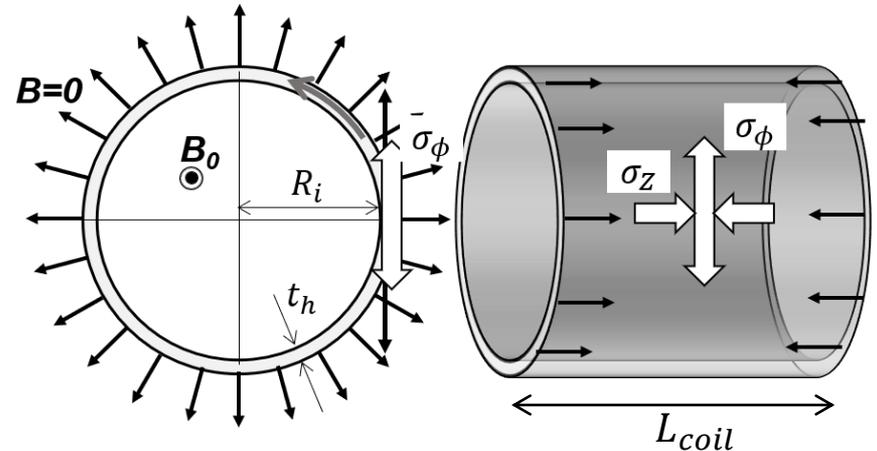
- 電磁応力からの考察

$$E = \frac{B_0^2}{2\mu_0} (\pi R_i^2 L_{coil})$$

$$\sigma_\phi = \frac{B_0^2 R_i}{2\mu_0 t_h}$$

$$M = 2\pi R_i L_{coil} t_h \gamma_0$$

$$E/M = \frac{\sigma_\phi}{2\gamma_0}$$



- 高い許容応力  $\sigma_a (> \sigma_\phi)$  を持つ軽い材料 → 高E/M

# ソレノイド電磁力、応力分布

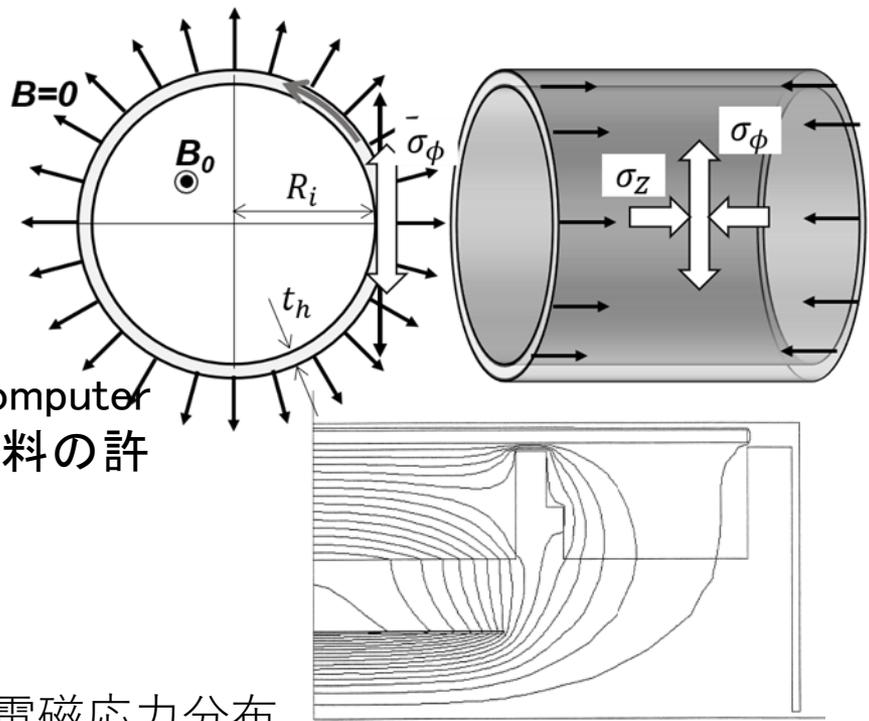
- 空芯ソレノイドでの概略値

$$\sigma_{\phi} = \frac{B_0^2 R_i}{2\mu_0 t_h}, \sigma_z = \frac{B_0^2 R_i}{4\mu_0 t_h}$$

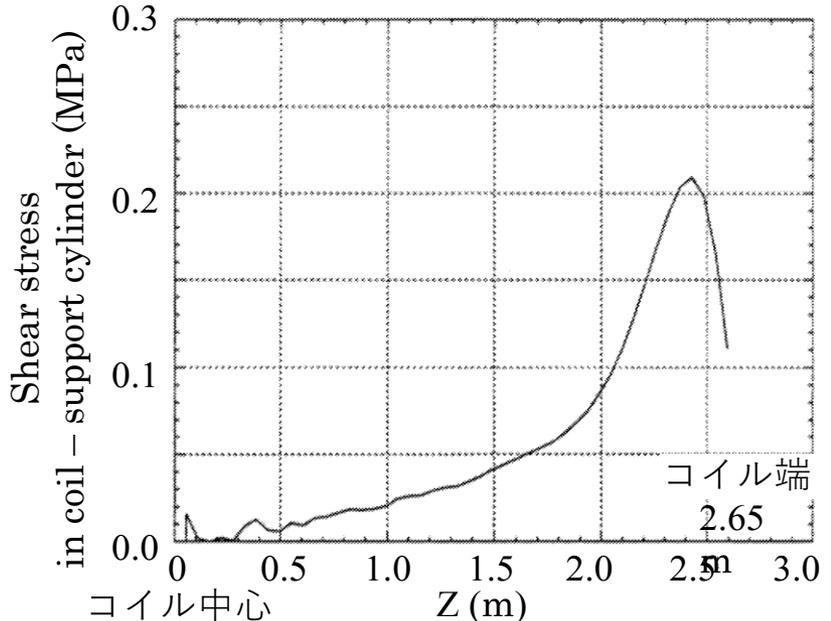
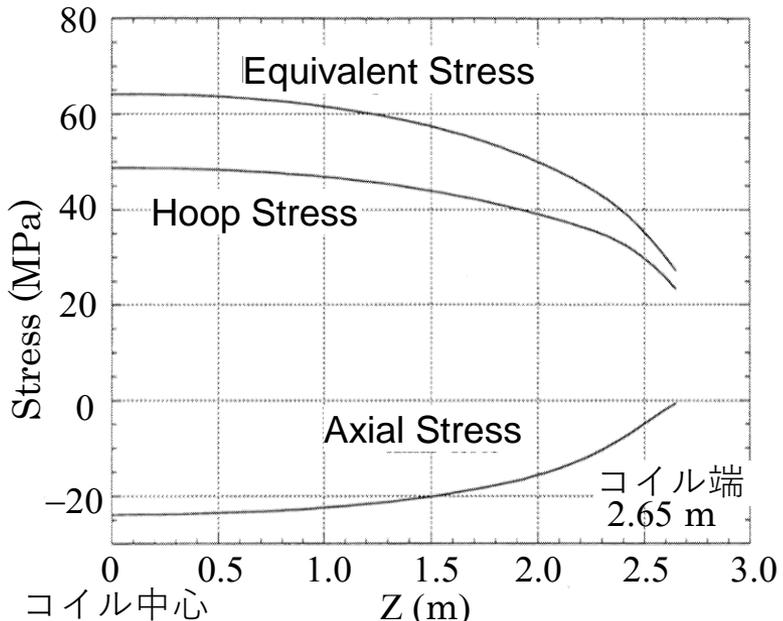
- 通常は、等価応力やミーゼス応力をCAE (Computer Aided Engineering) で計算し使用している材料の許容応力以下であること確認

等価応力 (Stress Intensity)  $\sigma_{int} \approx \sigma_{\phi} - \sigma_z$

$$\text{ミーゼス応力 } \sigma_{eq} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_{\phi} - \sigma_z)^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{\phi}^2 \right] \right\}^{1/2}$$



ATLASソレノイドの電磁応力分布



# 低物質質量を目指すコイルと指標：E/M比(2)

- 熱的な視点から考察

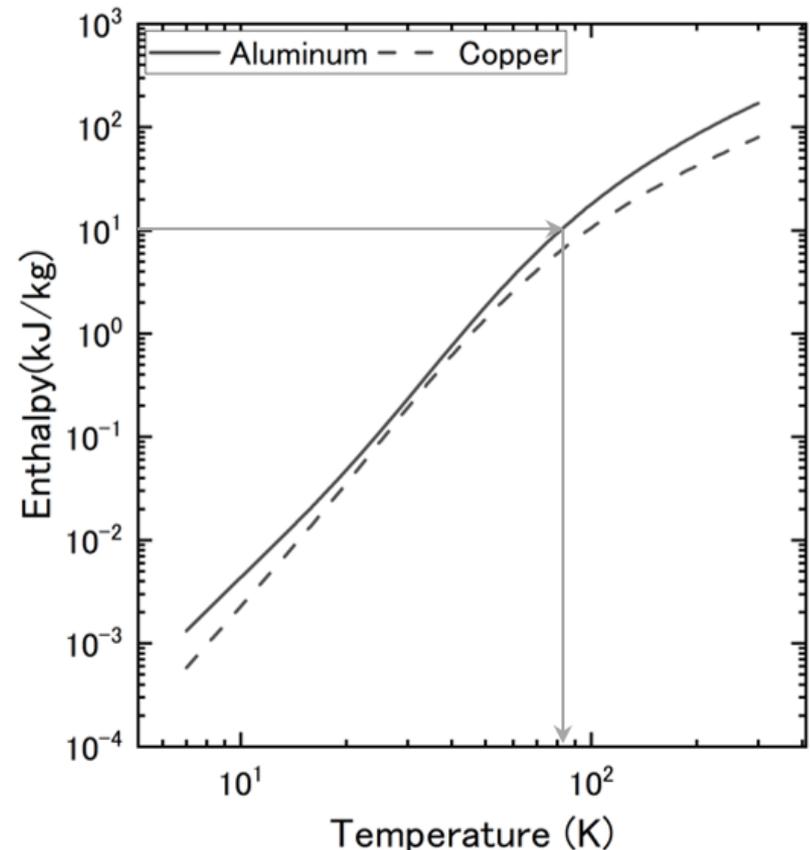
全磁気エネルギーが熱エネルギーとしてコイルが均等に吸収した時の温度上昇に相当。

$$E = M(h(\theta_Q) - h(\theta_0))$$

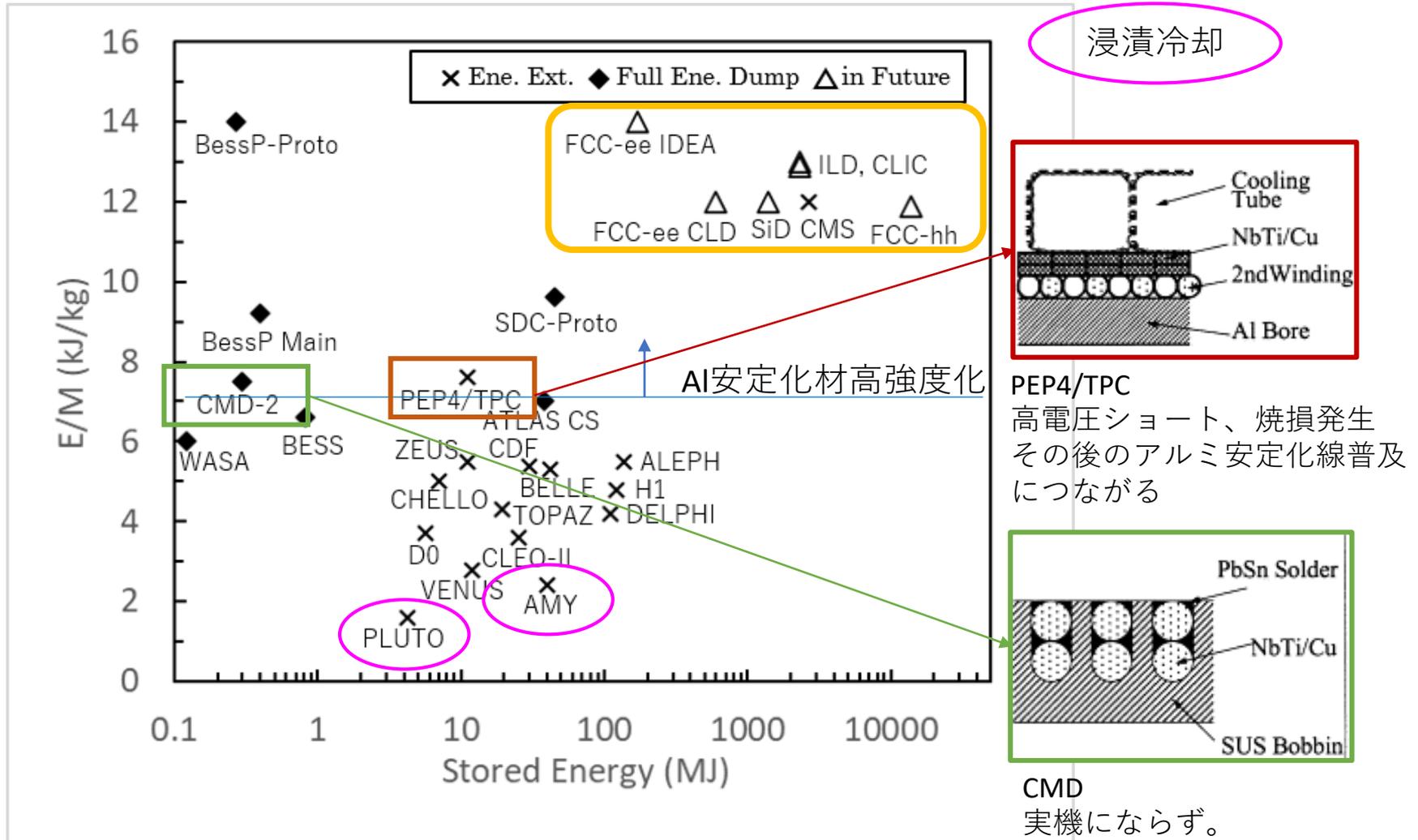
- E/M = 10 kJ/kgは80 Kに相当。

- 実際には温度分布形成

- Hot Spot出現
- クエンチ保護の重要性増。



# 低物質質量を目指すコイルと指標：E/M比(3)

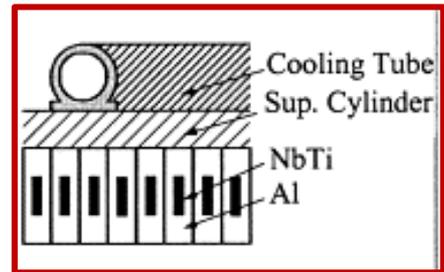
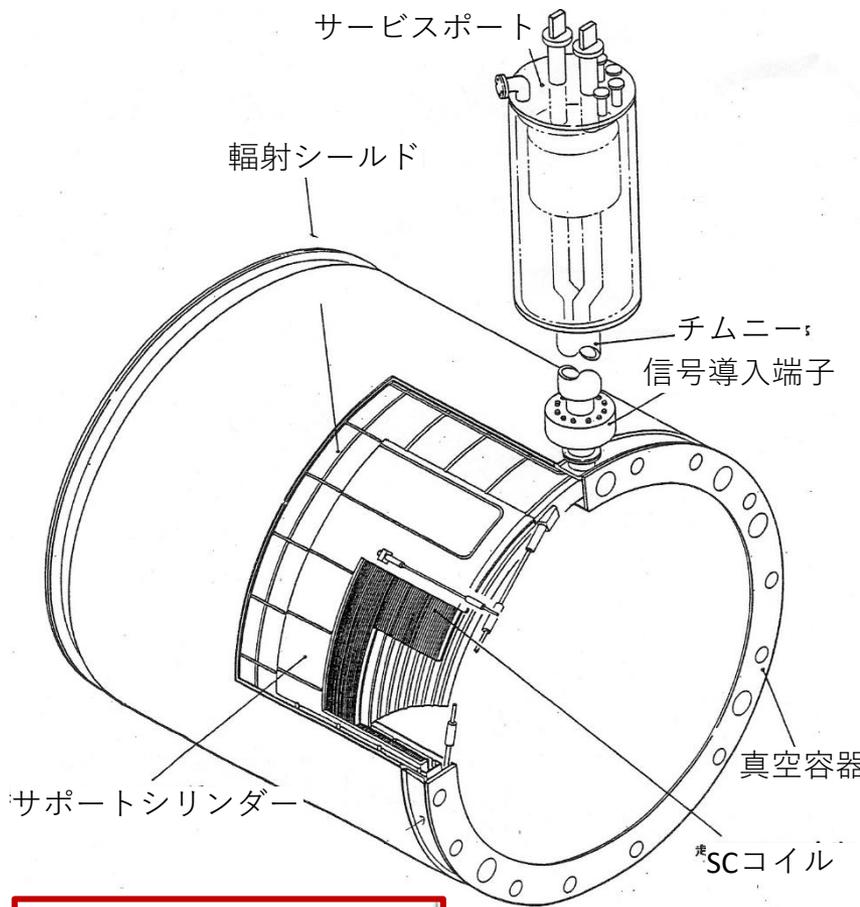


# 低物質質量を目指した技術要素-薄肉ソレノイドの特徴(1)

低物質質量のために導入された技術要素

技術要素	導入機
アルミ安定化超伝導線	ISR, CELLO
伝導冷却	
同時押出法によるアルミ安定化線	
直接内巻き法	CDF
サーモサイフォンによる冷媒供給	TOPAZ
CFRP真空容器外筒	ALEPH, DELPHI
純アルミ板によるクエンチ伝播	VENUS
アルミハニカム真空容器外筒	BESS
Zn添加によるアルミ材強化	SDC-P
無絶縁巻線	CMD-2
Ni添加によるアルミ材強化	ATLAS
アルミ合金付加による強化	CMS
サポートシリンダー無	BessPolar

アルミ安定化線で巻線されたコイル外周をシリンダーで囲み樹脂含侵で一体化。シリンダー上の冷却配管から伝導冷却される。



## 低物質質量を目指した技術要素-薄肉ソレノイドの特徴(2)

- 純アルミで被覆されたNbTi/Cuケーブル（アルミ安定化超伝導線）
- 巻線外周をサポートシリンダーで補強する。冷却配管はサポートシリンダー外面に配置され、コイルは伝導冷却される。ヘリウム容器は無くなる。
- 巻線内側には巻枠など構造物は無い。
- 巻線はエポキシ樹脂で含浸され、サポートシリンダーも含めて、機械的・熱的に一体化させている。

結果として

- 軽量なコイルとなり、その耐震性も含め支持材の負担が減る。予冷時間が短縮される。
- 伝導冷却のため、浸漬冷却のようにクエンチ時の液体ヘリウム突沸が起きず、圧力上昇が緩慢で、冷却系の保護が容易。
- コイル温度が把握できるので、冷却系の運転制御に正しく反映することができる。

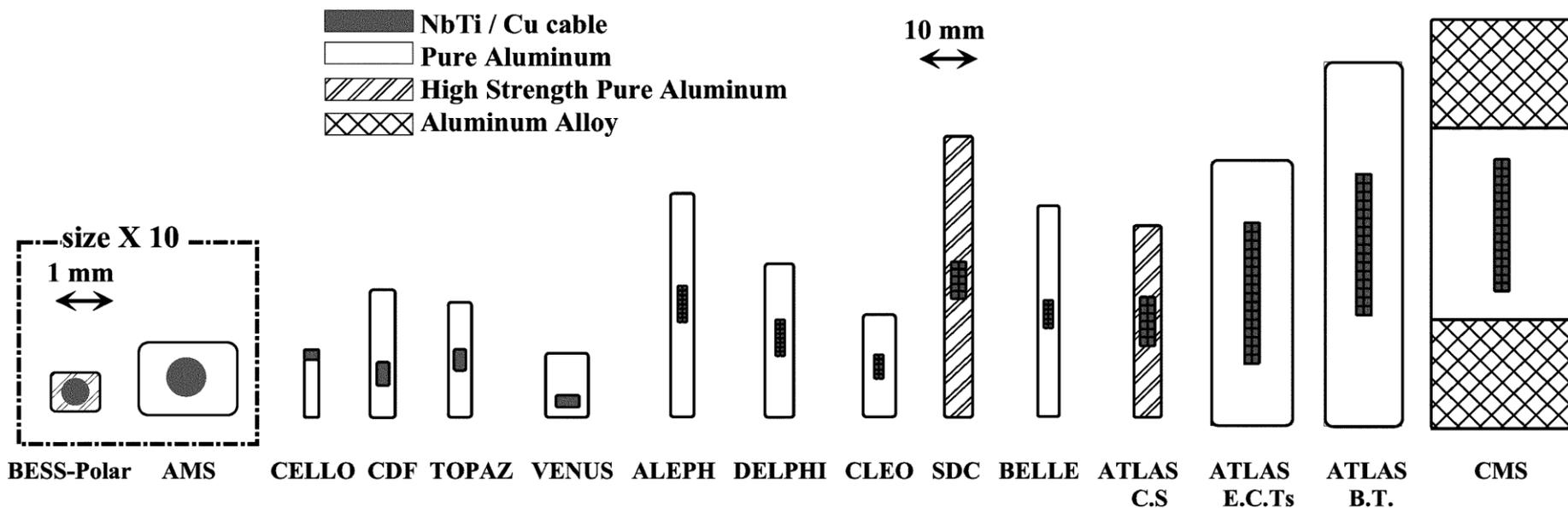
# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  - 2. アルミ安定化超伝導線**
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

# アルミ安定化超伝導線

純アルミを高い断面比率（5以上）で銅マトリックスNbTi複合多芯線を被覆。

- 安定化：ヘリウムへの熱伝達による冷却安定性は期待できないので、擾乱を吸収は線材の熱容量に依存。**エンタルピー安定性**。
- クエンチ保護：クエンチに発展した時のジュール発熱と温度上昇・電圧上昇を緩和。保護動作の時間的余裕を与える。
- 純銅と比べ物質量が1/3以下。物質量増加を抑えつつ、安定化材の比率を上げる。
  - アルミマトリックスのNbTi複合多芯線は製作困難。
- 電磁力支持：機械強度の向上によって実現。自己支持コイル。



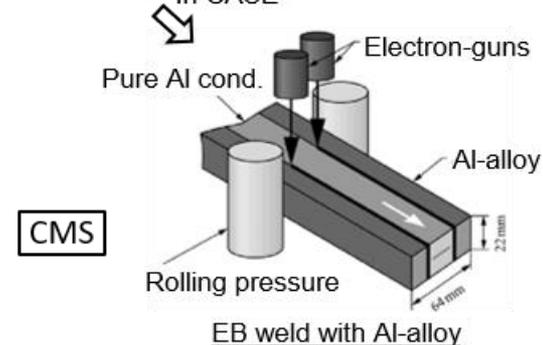
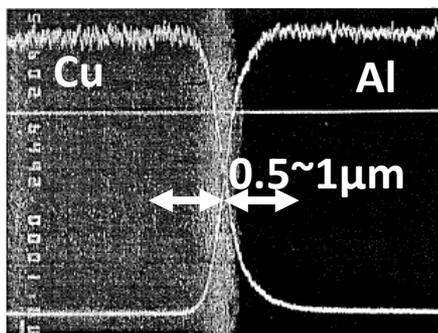
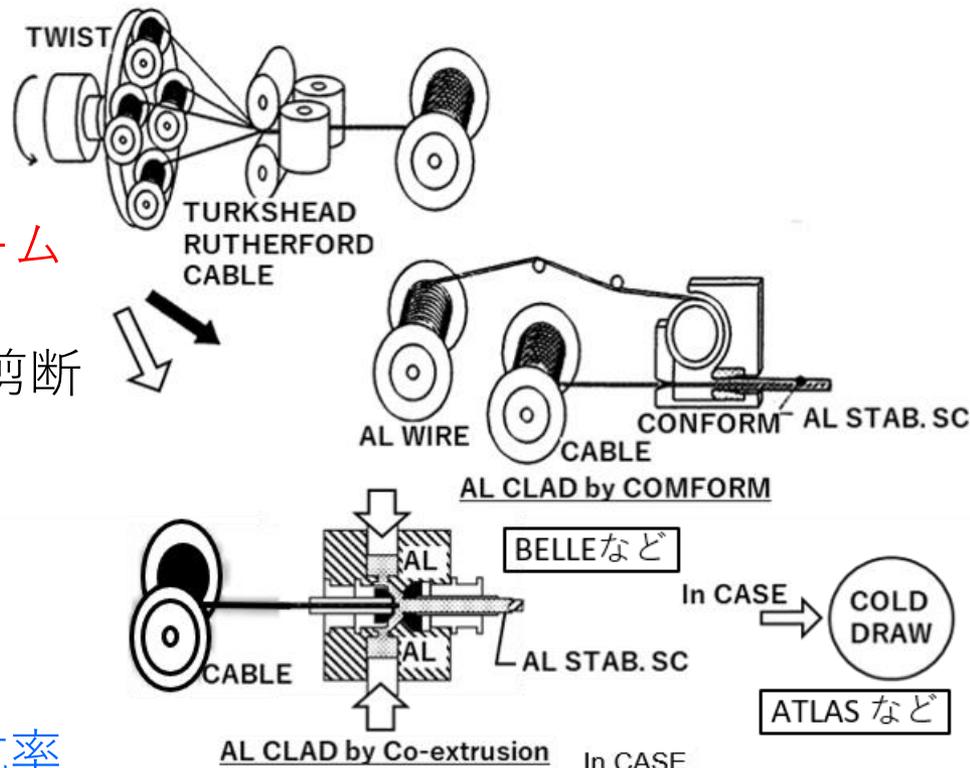
# アルミ安定化超伝導線の製造(1)

## ① 銅マトリックスNbTi複合多芯線

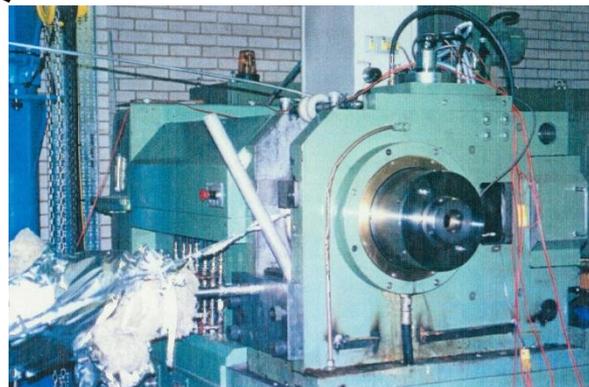
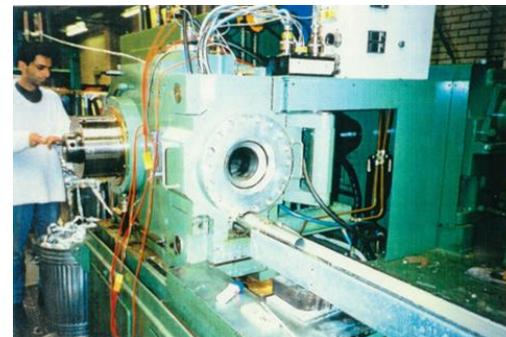
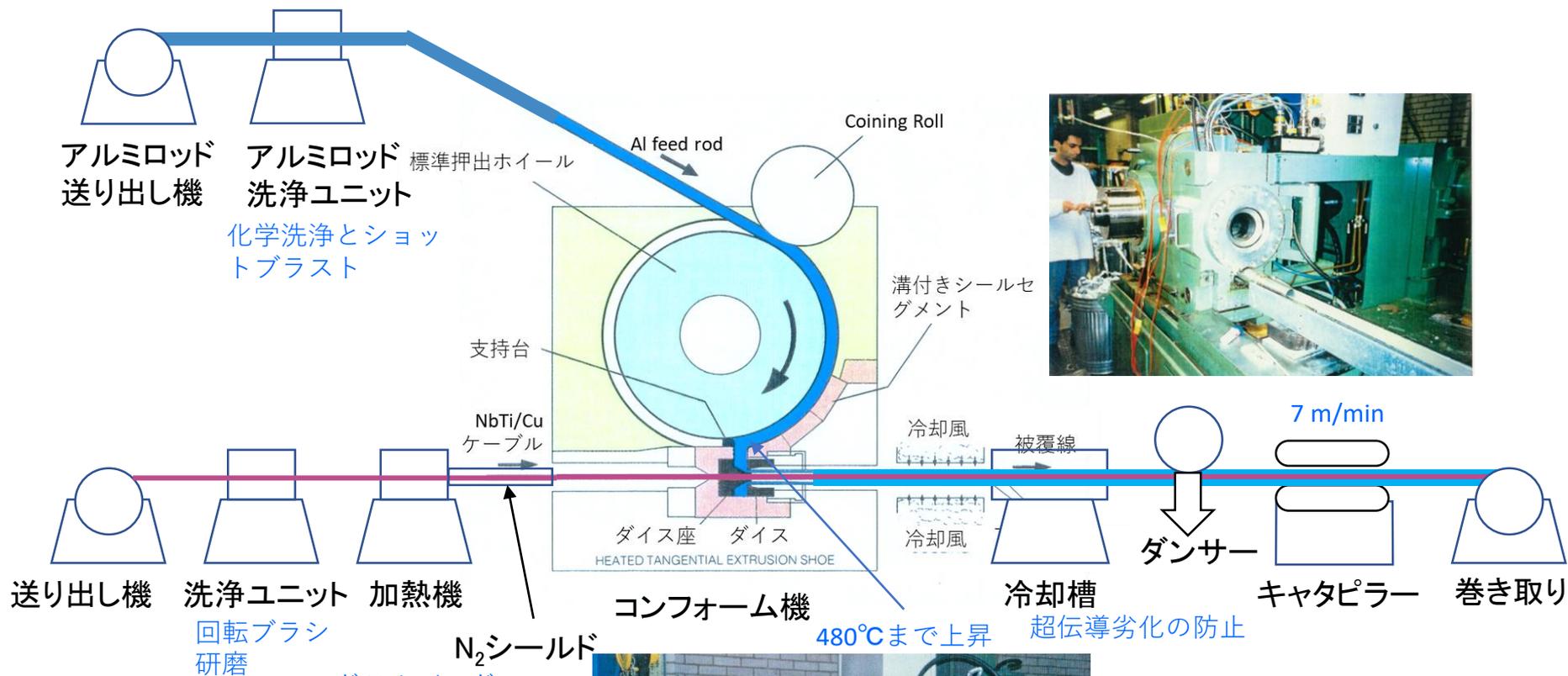
- 撚線化 (1本の時もあり)。
- 銅比は低い**0.8~1.2**。

## ② アルミ被覆

- 静水圧式同時押出機やコンフォーム機を使用。
- NbTi/Cu線表面の銅と純アルミの剪断摩擦接合。
- **AlCu金属間化合物の生成防止**
  - AlCu脆く電気抵抗高い
  - 高温時間<10 min,
- AlとCu境界**1μm**程度の拡散層,  
**> 30 MPa**剪断強度、**~10<sup>-11</sup>Ω-m**抵抗率
- NbTi/Cuの**余熱、表面洗浄**



# アルミ安定化超伝導線の製造(2)



# アルミ付加-物質増を抑えつつ安定化・保護

## 安定性の指標: MPZ-MQE

- LHeへの熱伝達は期待しない。
- 擾乱によって発生した常伝導領域の発熱と導体に沿った方向への伝導冷却のバランス

$$I^2 \frac{\rho l_{MPZ}}{A} = 2Ak_0 \frac{(\theta_c - \theta_0)}{l_{MPZ}}$$

$$l_{MPZ} = (2L_0\theta_0(\theta_c - \theta_0))^{\frac{1}{2}} \frac{A}{\rho I}$$

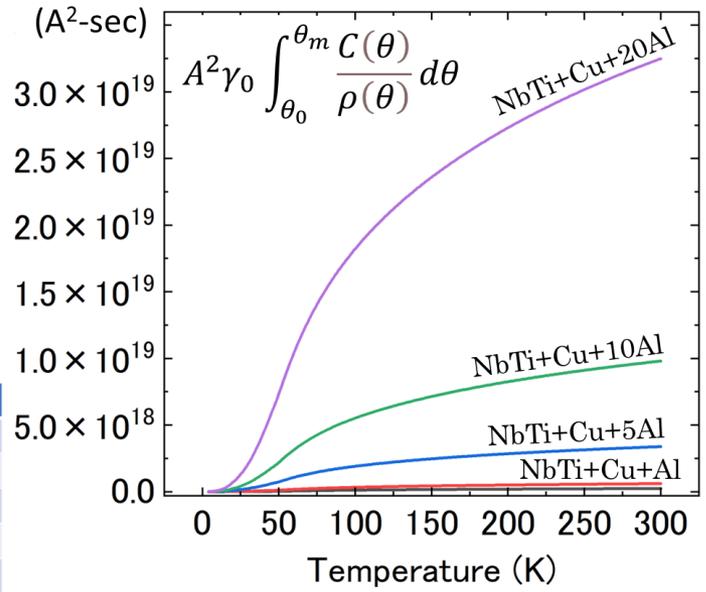
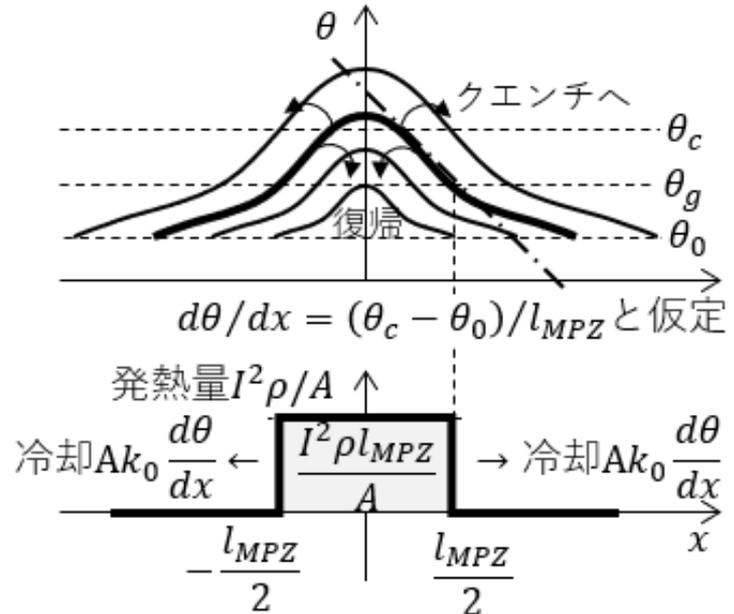
$$E_{MQE} = \{2k_0(\theta_c - \theta_0)\}^{\frac{1}{2}} \gamma_0 \Delta h \frac{A^2}{\rho I}$$

## クエンチ保護: 断熱温度上昇抑制

- 常伝導転移をした箇所の温度上昇を断熱状態(最悪)で検討。

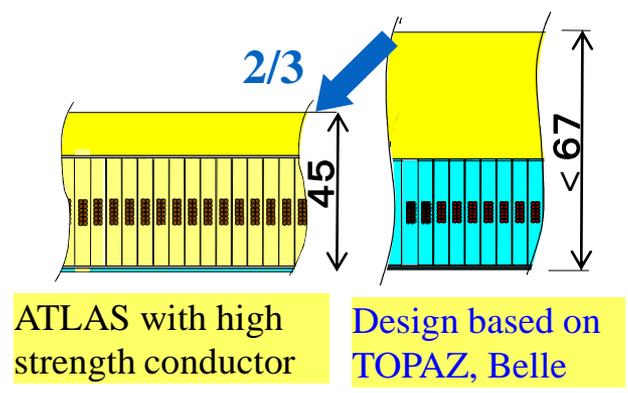
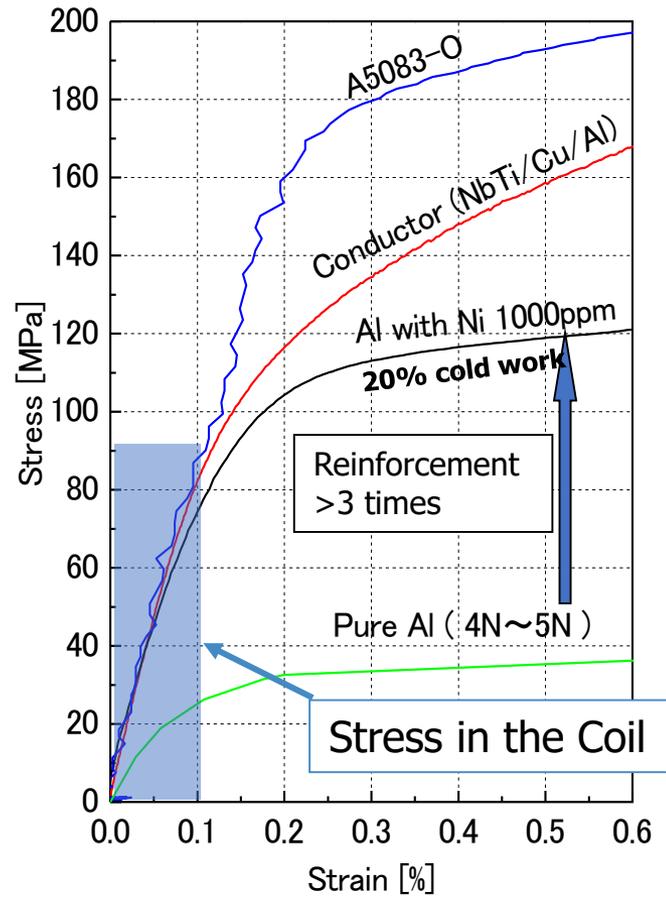
$$\int_0^\infty I(t)^2 dt = A^2 \gamma_0 \int_{\theta_0}^{\theta_m} \frac{C(\theta)}{\rho(\theta)} d\theta$$

材質	輻射長(mm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
Al	89	2.70
Cu	14.4	8.96
Nb	11.6	8.57
Ti	35.6	4.54
Fe	17.6	7.84



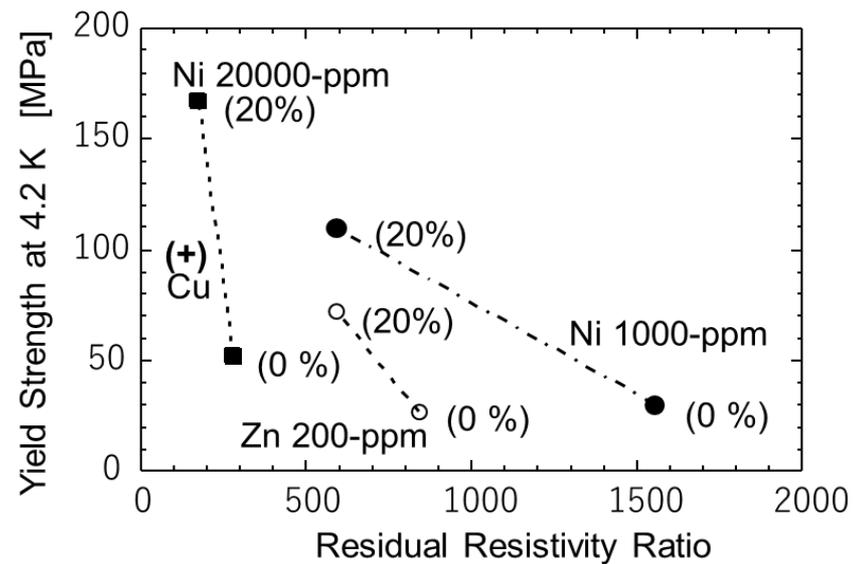
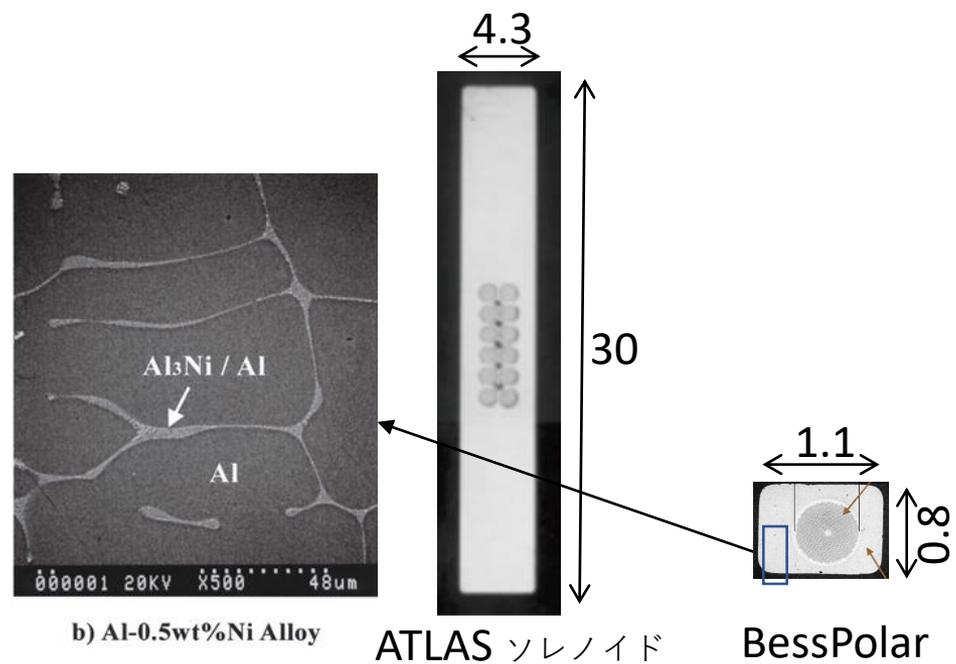
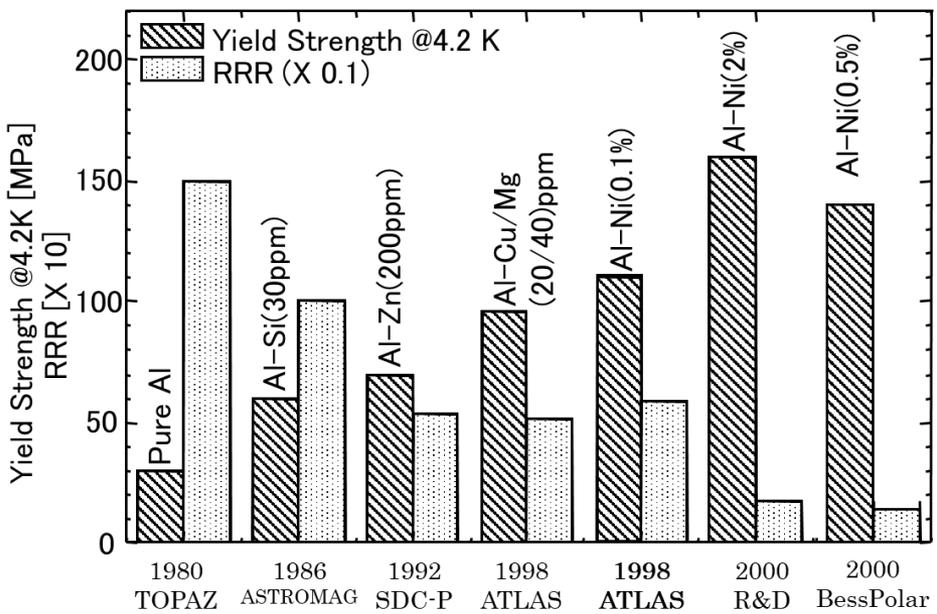
# アルミ付加-機械強度向上(1)

- 電磁力(フープ力)は線材自身の張力とアルミ合金(A5083など)製のサポートシリンダーで保持。
  - 99.999 %純度純アルミの降伏強さ(0.2 %耐力)は30 MPa程度。
  - 180 MPaのサポートシリンダー及びNbTi-Cuのケーブルが主体。
- アルミ安定化材の強度が増すと、外周のサポートシリンダーを薄くできる。→ 薄肉化
  - 純アルミの低抵抗率を維持したまま、機械強度を上げる手法の確立。
  - ATLASソレノイド
    - 純アルミ材(純度>99.999%)にNiを微量(1,000 ppm)添加
    - 同時押し出し法によって被覆後、20%減面積の冷間加工を加える。



# アルミ付加-機械強度向上(2)

- アルミ材に添加したNiが、析出後  $Al_3Ni$  金属間化合物として粒状に晶質化し、機械加工硬化を加える(加工により細くする)過程で繊維状に絡み合い、アルミニウム母材との複合構造が形成される。
- 前者が機械強度を、後者が低い抵抗率の保持に寄与している。

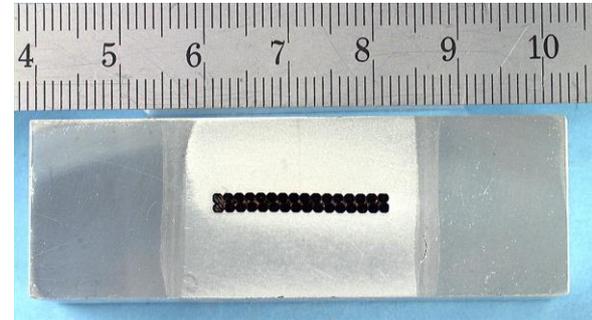
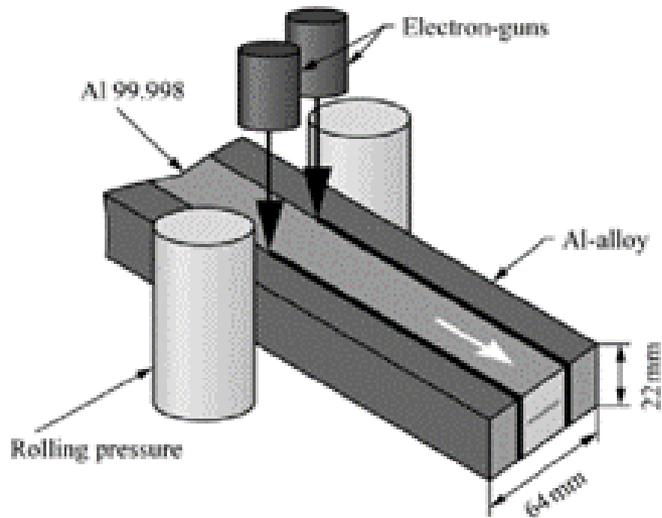


# アルミ付加-機械強度向上(3)

別のアプローチ

## アルミ合金の付加(CMS)

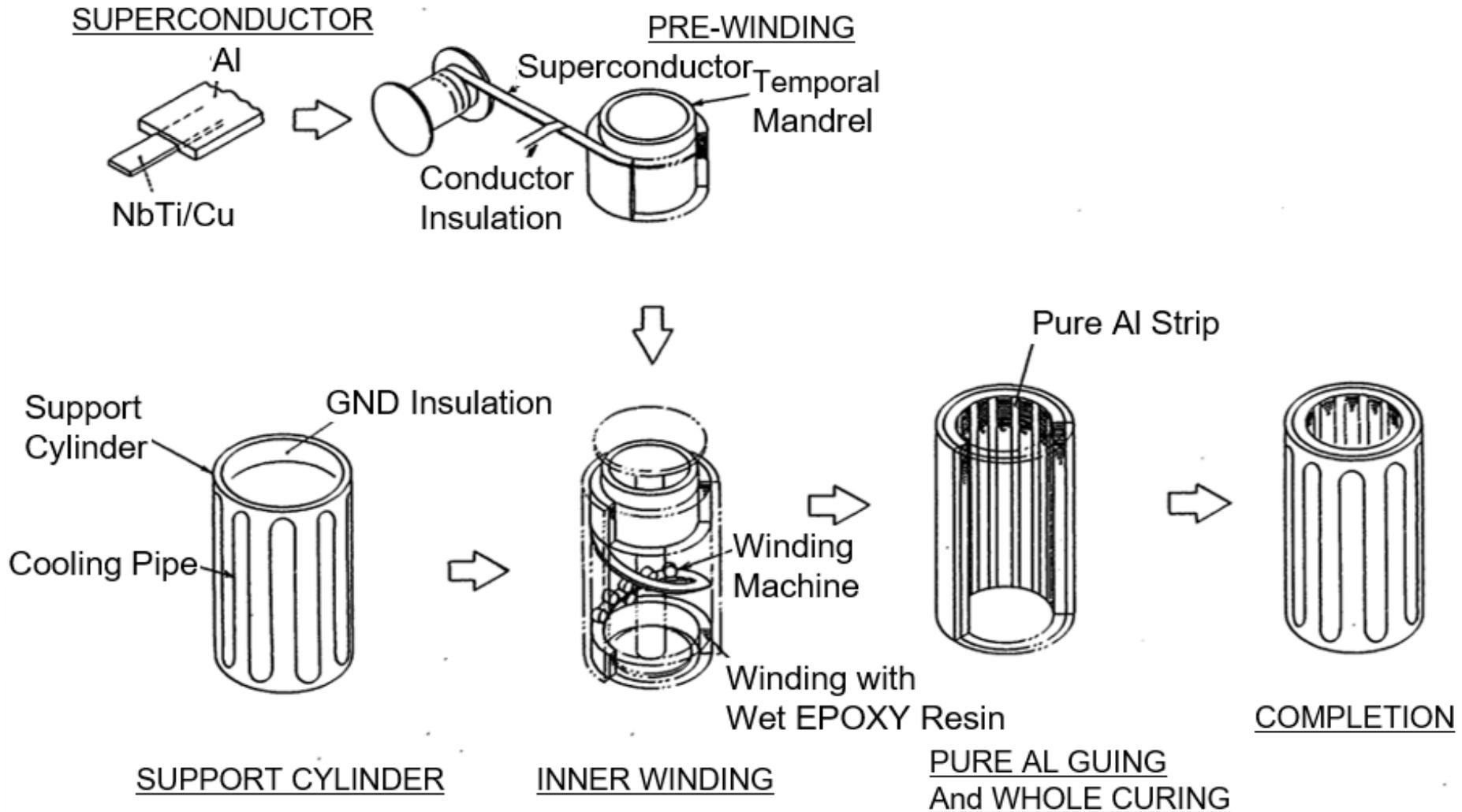
- 高強度アルミ合金構造材(AW6082)を連続電子ビーム溶接。
- 全体として強度が250 MPaに達する。



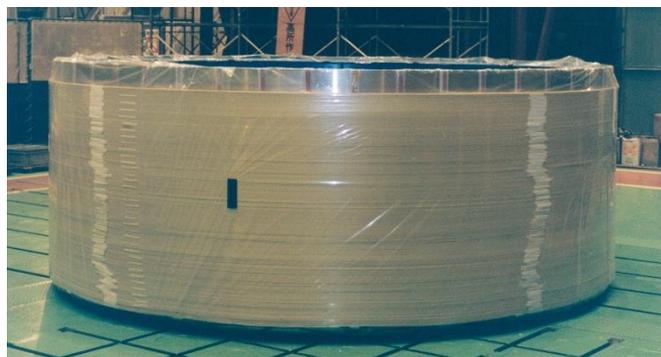
# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  - 3. コイルの製作（直接内巻き）**
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

# コイルの製作(1)



# コイルの製作(2)

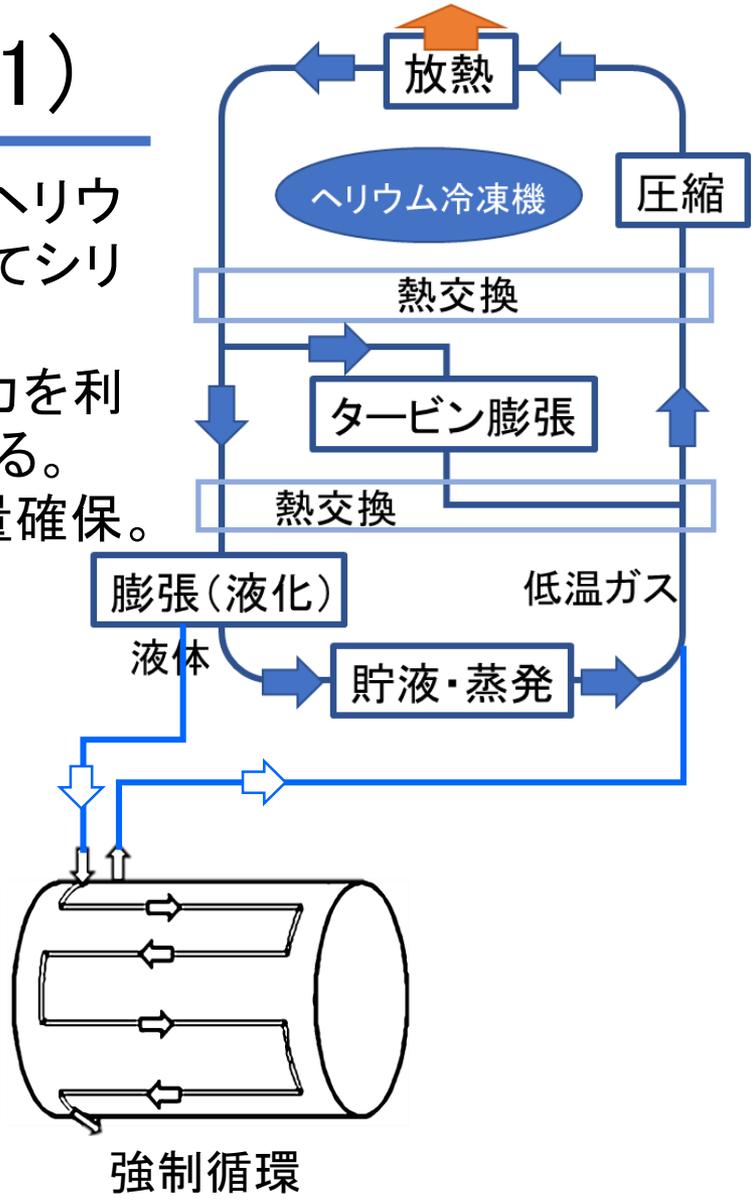


# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  - 4. 伝導冷却コイル構造**
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
4. 将来計画

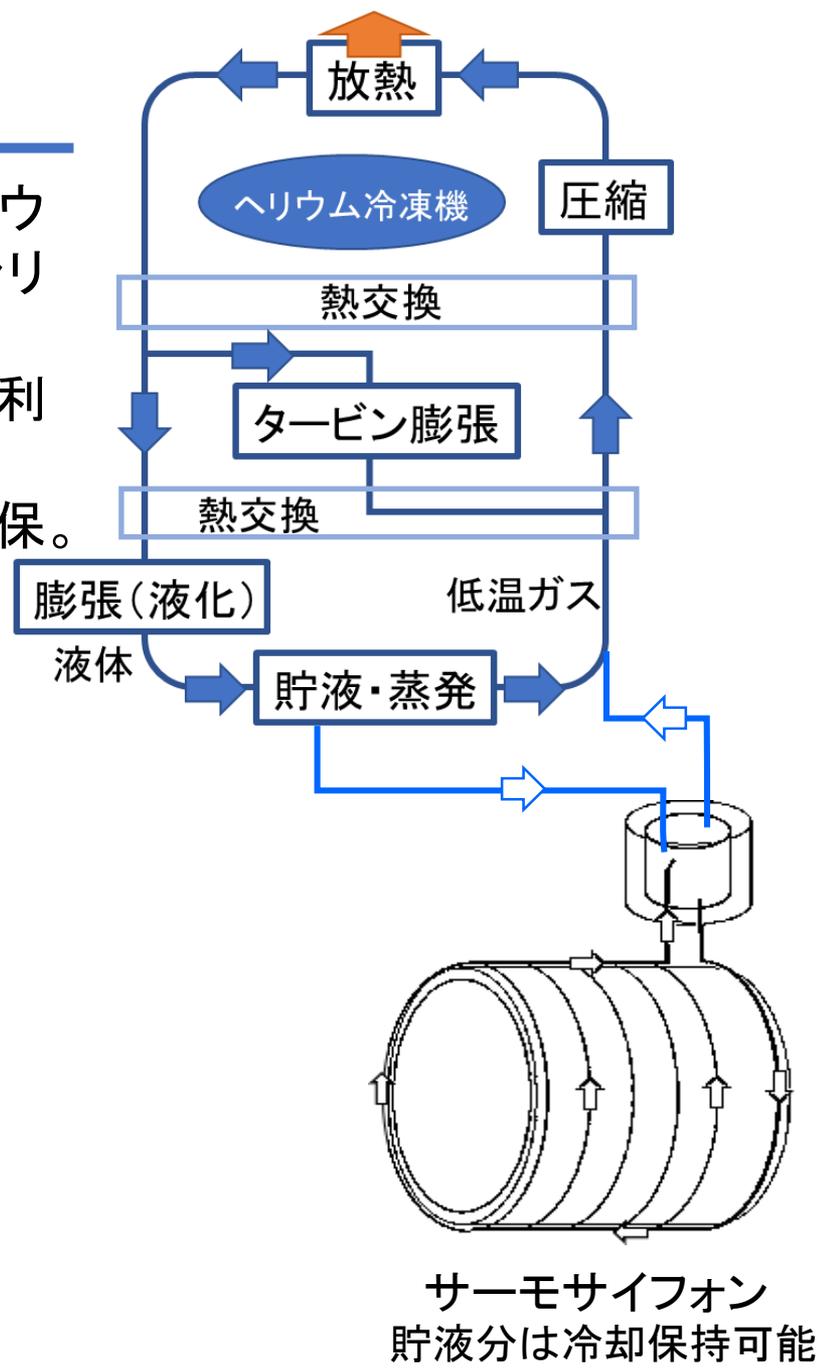
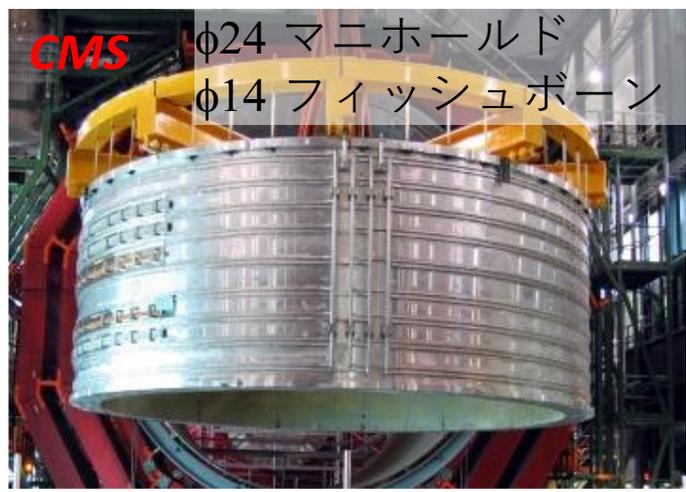
# 伝導冷却超伝導コイル(1)

- サポートシリンダーの外面に飽和液体ヘリウム(2相流)が流れる冷却配管を配置してシリンダー内面の巻線を伝導冷却する。
- 2相流は、圧縮機による**強制循環**と重力を利用する**サーモサイフォン**が採用されている。
- 配管径は室温での圧力損失で必要流量確保。



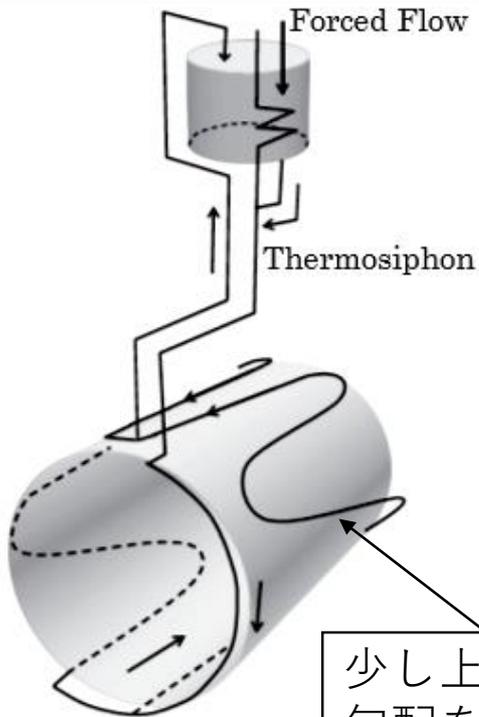
# 伝導冷却超伝導コイル(2)

- サポートシリンダーの外面に飽和液体ヘリウム(2相流)が流れる冷却配管を配置してシリンダー内面の巻線を伝導冷却する。
- 2相流は、圧縮機による**強制循環**と重力を利用する**サーモサイフォン**が採用されている。
- 配管径は室温での圧力損失で必要流量確保。

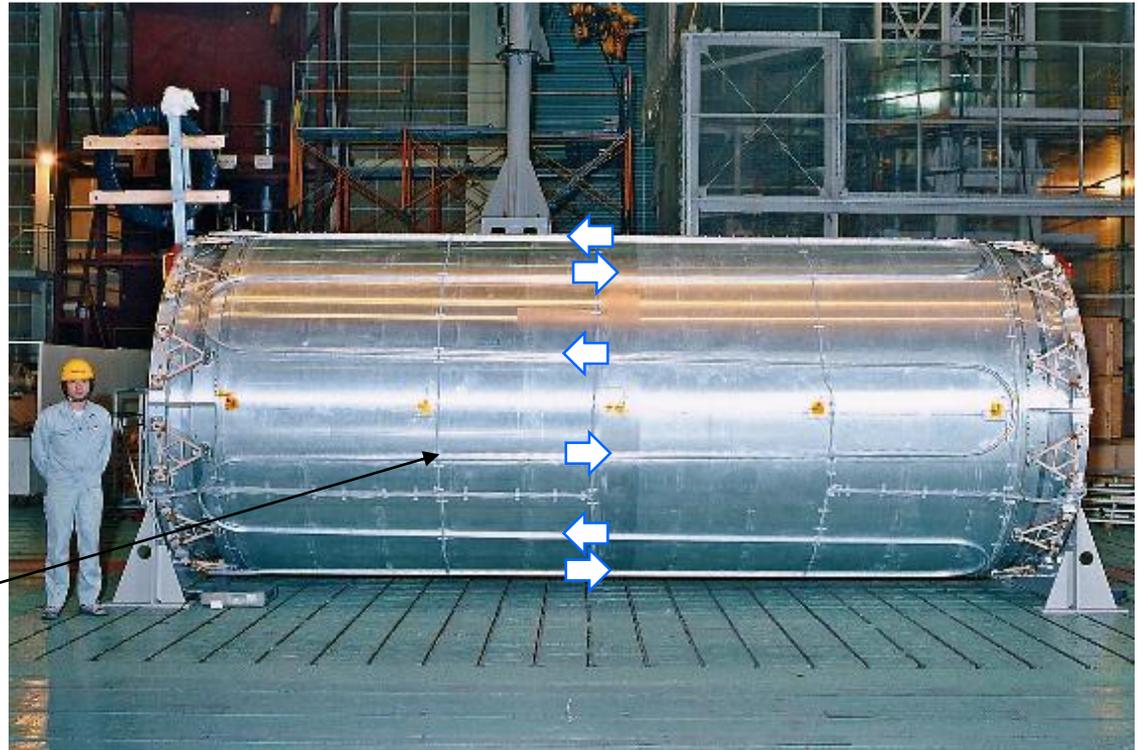


# 伝導冷却超伝導コイル(3)

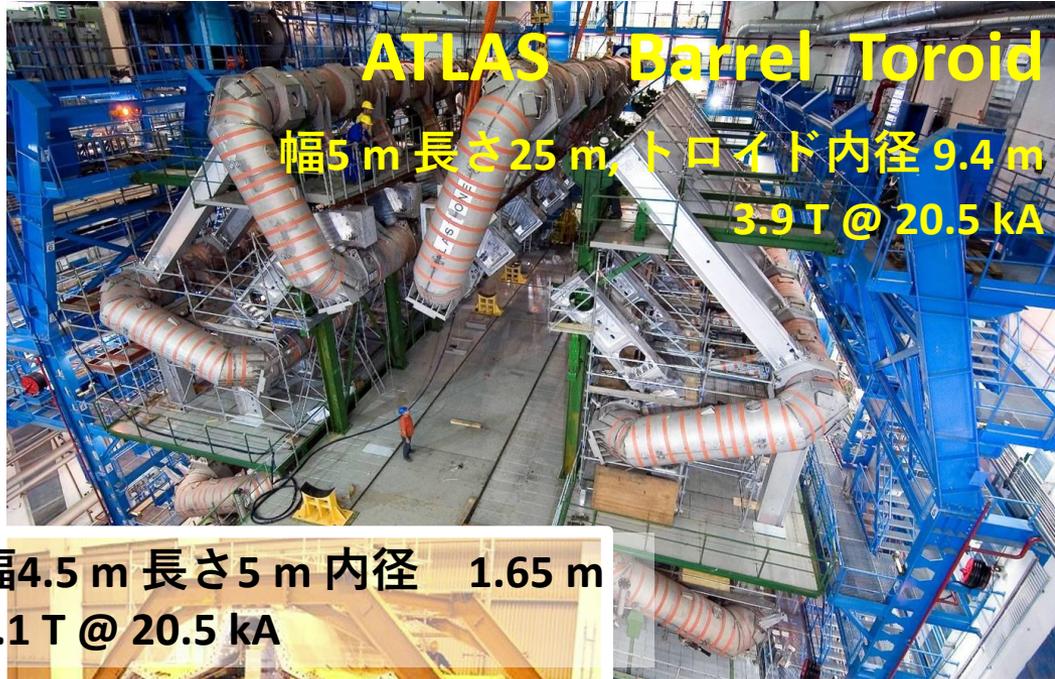
- ATLASソレノイドでは強制冷却とサーモサイフォンをバルブ操作で切り替えることができる。
  - これまで強制冷却で運転してきたが、次期運転からサーモサイフォンで運転する。(冷凍機制御はATLASTロイドに集中)



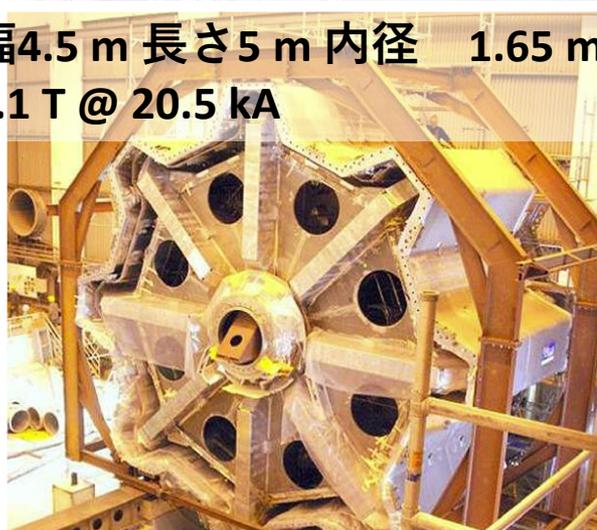
少し上向きの  
勾配をつけて  
いる。



# 伝導冷却超伝導コイル(4) トロイダル

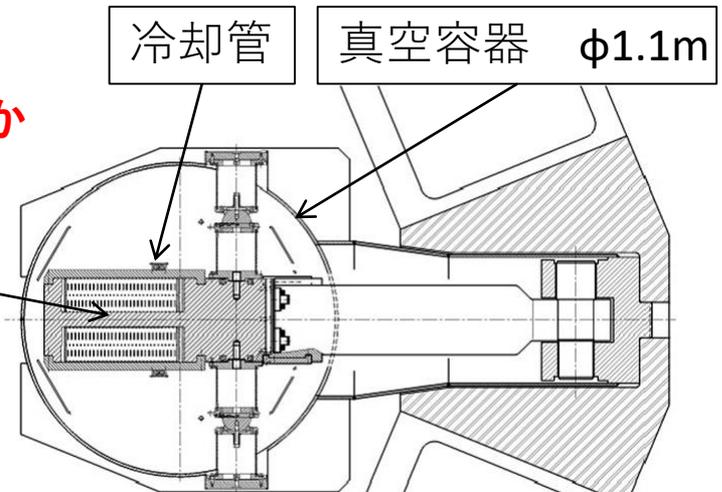


幅4.5 m 長さ5 m 内径 1.65 m  
4.1 T @ 20.5 kA



いずれも冷却配管から伝導冷却される。

2×ダブルパンケーキコイル



ATLAS BT クライオスタット断面図

# 伝導冷却超伝導コイル(5) 小型冷凍機冷却

高温超伝導リードと4Kギフォードマクマホン小型冷凍機の展開によってクライオクーラーによる無冷媒超伝導磁石の実用化が進む。

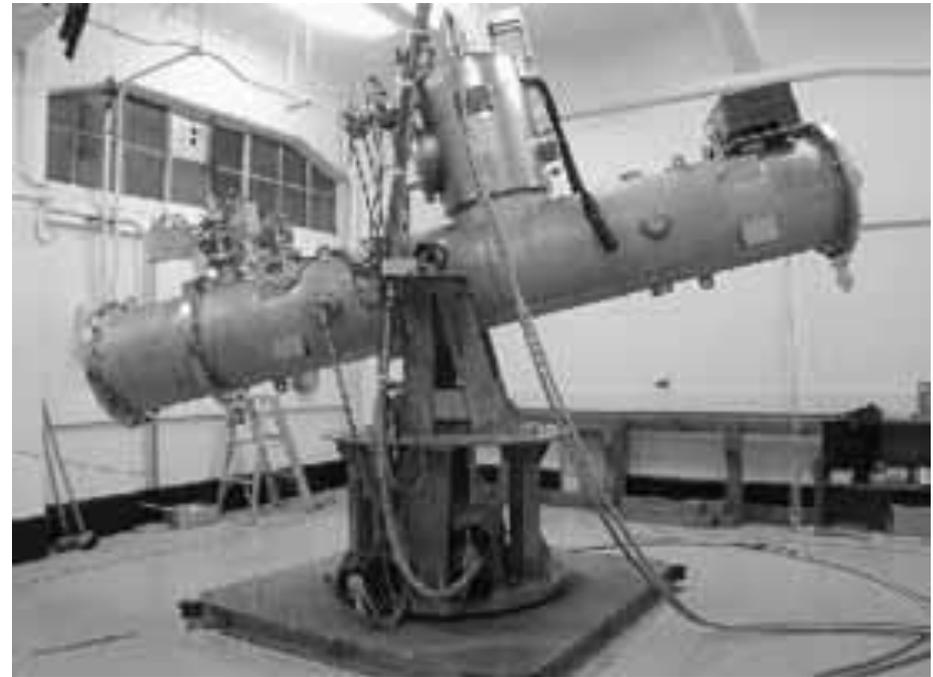
## 太陽AXION観測用超伝導ダイポール@東大 0.5W-4K-GM(2台)による伝導冷却

仕様

- 20 mm ギャップの2個のレーストラック
- 直線部長 2.1 m, 曲線内半径 50 mm
- コイル幅 100 mm, コイル厚さ 64 mm
- $B_0$  5.0 T,  $B_m$  7.18 T, 336 A, 875 kJ

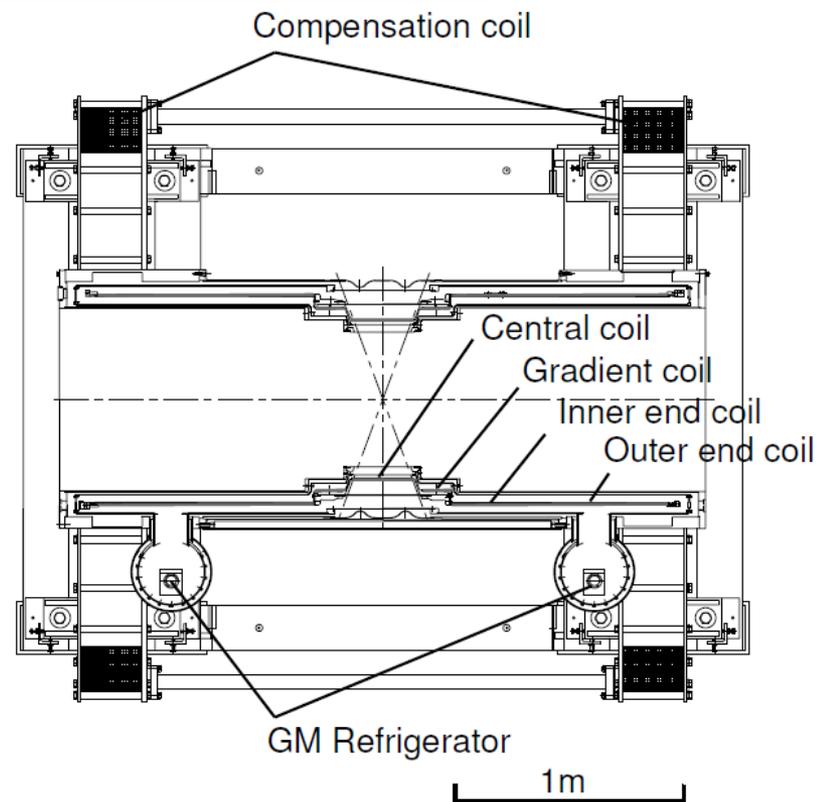
特徴

- 2台のGMの伝導冷却で伝導冷却  
ヘッド3.8 K, コイル 5.1 K
- 熱伝導体は銅バーや銅板
- PCモードで励磁
- 予冷時間 300 hour



# 伝導冷却超伝導コイル(6) 小型冷凍機冷却

## $\mu$ 粒子崩壊精密測定用薄肉ソレノイド 1W-4KGM (2台)



Coil	Central	Gradient	Inner end	Outer end
Inner dia. (mm)	699.1	809.1	919.1	919.1
Outer dia. (mm)	711.6	820.6	929.5	929.5
Length (mm)	240.3	110.4	189.9	749.2
Layers	4	4	3	3
Turns	1068	399	240	1548
Winding density (Turns/m)	4444.4	3614.1	1263.8	2066.2
Current (A)	360	360	360	360
Inductance (H)	1.64	0.62	0.35	2.29
Energy $E$ (kJ)	106	40	23	148
Weight $M$ (kg)	9	4	7	28
$E/M$ (kJ/kg)	11.8	10.0	3.3	5.3

中心磁場 1.27 T @ 360 A  
コイル温度 4.2-4.4 K  
予冷時間 120 hour

# 伝導冷却超伝導コイル(6) 小型冷凍機冷却

BESSソレノイドの無冷媒改造

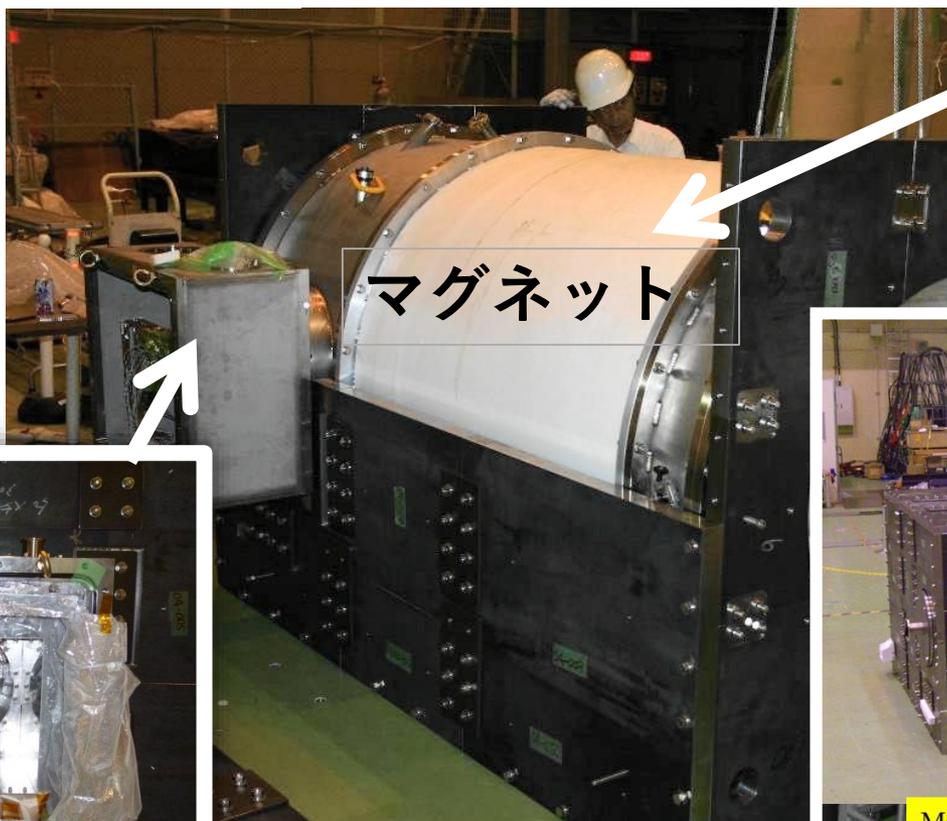
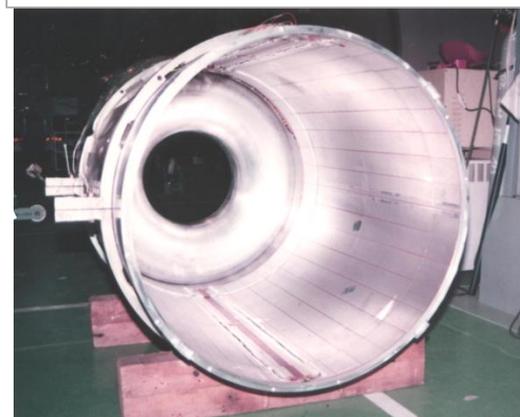
54W@40K-GM(1台)+1.5 W@4K-GM(1台)

検出器の校正  
小規模な素粒子実験  
KEK 1台、 DESY 1台

1 T @ 400 A

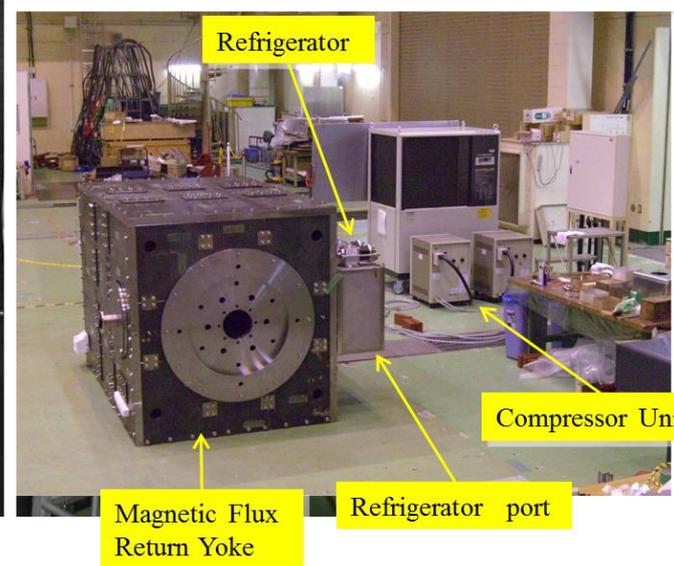
CL用に40 K GMが増

伝導冷却ソレノイド



マグネット

冷凍機ポート



Refrigerator

Compressor Unit

Magnetic Flux  
Return Yoke

Refrigerator port

# 伝導冷却超伝導コイル(7) 小型冷凍機冷却の要点

巻線部を通らない熱の流れ  
巻線部への熱の遮断

電気絶縁と熱伝達の両立  
接触熱伝達面の確保、AINの使用

HTS故障時の補償：  
バックアップ線（SUS  
ストリップなど）

サポート

電流リード

純アルミ 4000 W/m·K

小型冷凍機

輻射 0.15W/m<sup>2</sup>

コイル

コイル

口出し線の冷却+熱容量のため銅補強

接触熱伝達面

- 有効な面圧の範囲はワッシャの2倍くらい。
- ばねワッシャなどで面圧を保証しないと経年劣化を起こす。インジウムは塑性変形して弾性は期待できない。

小電流、大インダクタンスのコイル  
ヒーターによるクエンチ保護

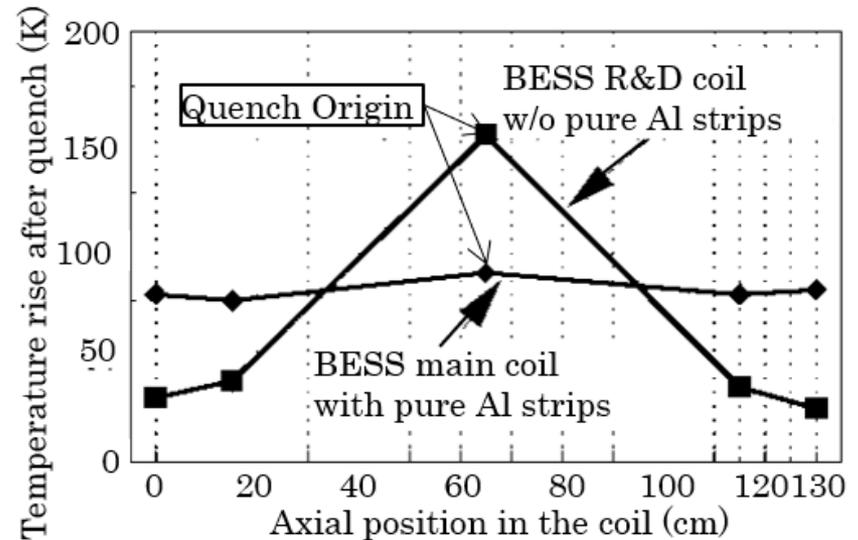
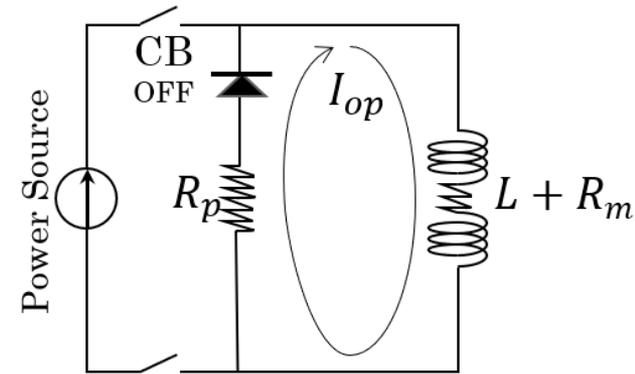
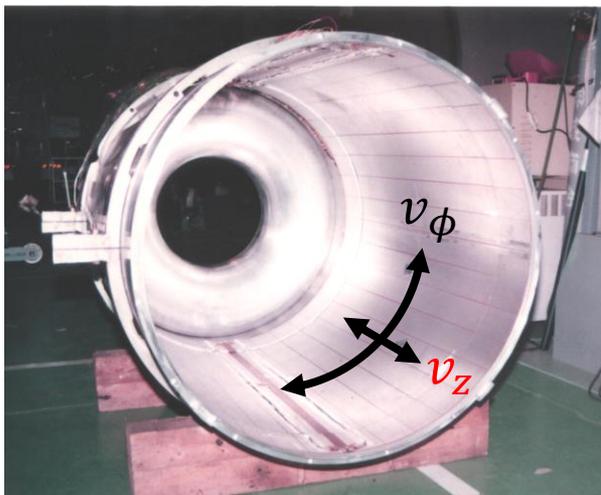
# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  - 5. クエンチ保護**
  6. クライオスタット
4. 将来計画

# クエンチ保護(1)

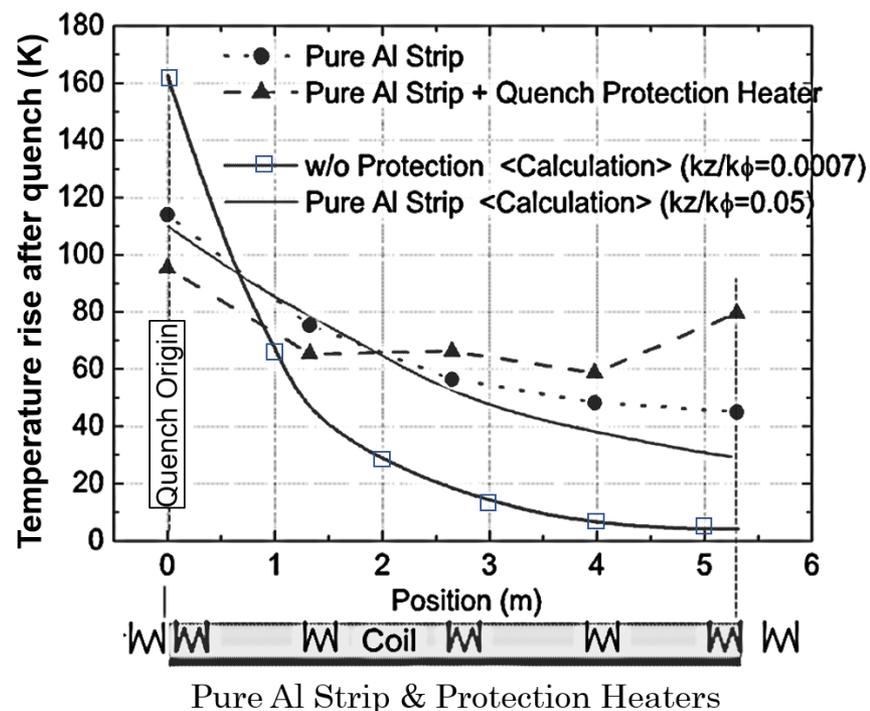
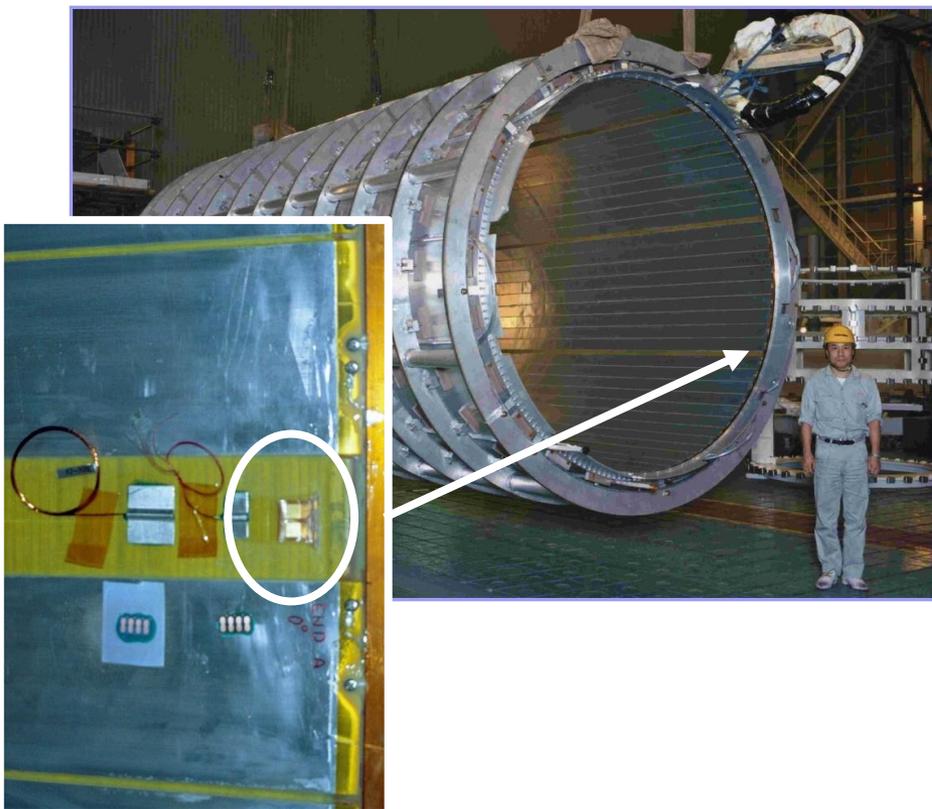
- クエンチ源の温度  $\theta_m$  が許容値(例えば300 K)に収まるよう電流  $I(t)$  を如何に早く下げることが基本の方針
- 励磁電流は時定数  $\tau_m = L / (R_p + R_m)$  で減衰する。
- 端子間電圧  $R_p I_{op}$  の制限から大型化による貯蔵エネルギー増加(インダクタンスの増加)に合わせて保護抵抗  $R_p$  を大きくすることはできない。
- 常伝導拡大を促して抵抗  $R_m$  を早く立ち上げる。
  - 純アルミストリップによる高速クエンチ伝播

$$v_\phi = \frac{j_e}{\gamma C} \left( \frac{L_0 \theta_s}{\theta_s - \theta_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad v_z = \left( \frac{k_z}{k_\phi} \right)^{\frac{1}{2}} v_\phi$$



# クエンチ保護(2)

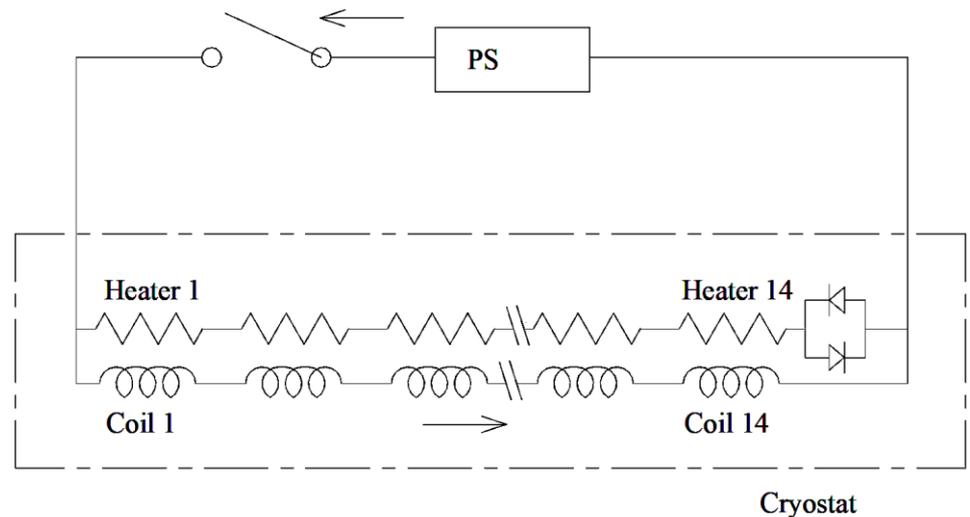
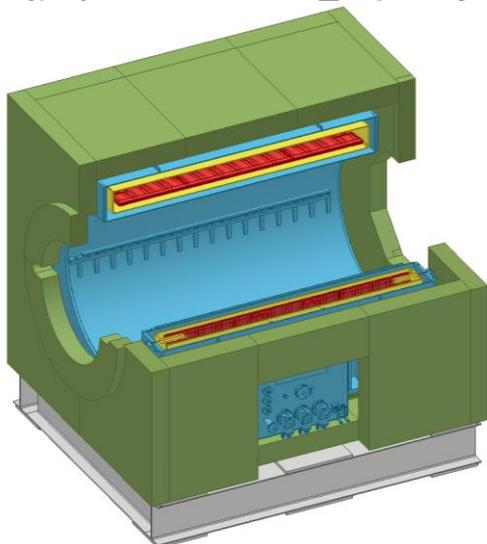
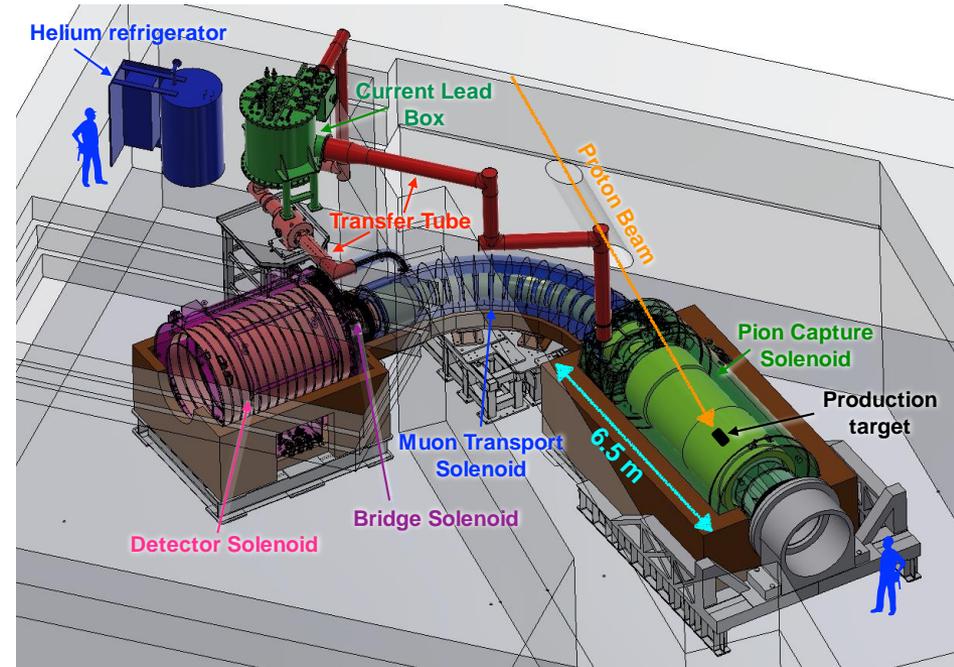
- ATLASソレノイドでは純アルミストリップに加え、ヒーターによる強制クエンチ。
- クエンチ伝播よりもより遠くの超伝導領域をより早く強制的に常伝導転移。
- 不連続のソレノイドやトロイダル、ダイポールのように分割されたコイル間ではクエンチ伝播は期待できない。
  - ヒーターによる強制クエンチが必要。ATLASTロイド。
  - 個別の消磁は、電磁力の向きの変化や均衡の崩れに注意。



# クエンチ保護(3) 小型冷凍機冷却検出器磁石で導入

## COMET検出器磁石の例

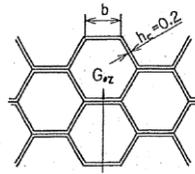
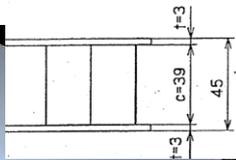
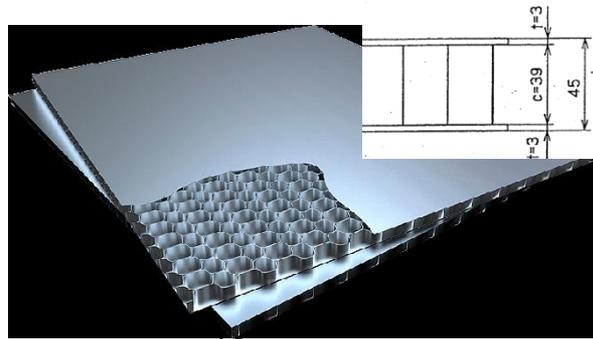
- Bore  $\phi$  2.14 m, L 1.9 m, t 8 mm
- 1 T @ 189 A、**236 H**
- 14個のL170 mmのコイルで構成
- クエンチ保護
  - ✓ 全てのコイルの外周側に $\phi$  1.5 mmの銅線をヒーターとして無誘導巻
  - ✓ クエンチ時、電源を遮断すると励磁電流がヒーターに転流し、全体が常伝導転移。ヒーター電源不要。



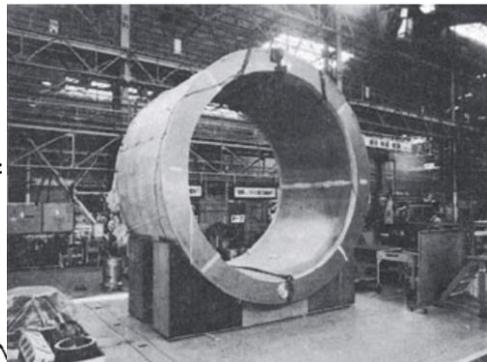
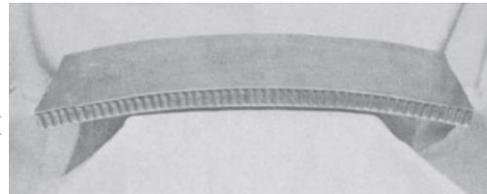
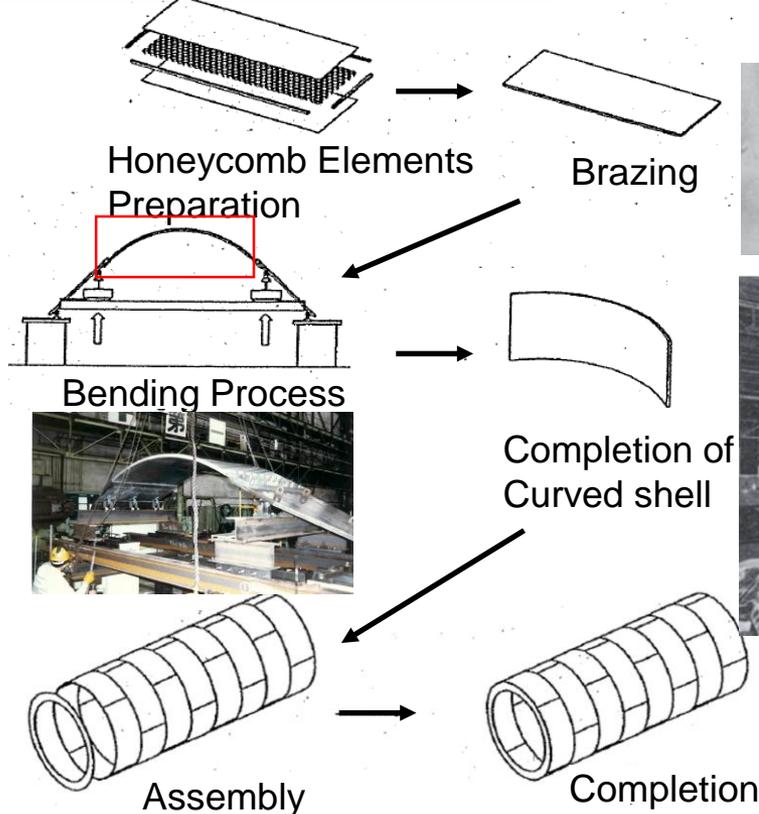
# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  - 6. クライオスタット**
4. 将来計画

# クライオスタット-真空容器外筒(1)



- 真空容器外筒は100 kPaの外圧円筒となるので、座屈モードの応力を受けそれに耐える曲げ剛性が必要。厚肉の円筒。
- アルミハニカムは剛性を確保しながら物質量を低減できる板材。SSC向けの超伝導ソレノイド (SDC) デモ機の真空容器に試作された(直径4.1 m,長さ2.1 m)。



	3-point bending (bending roller)	4-point bending
Condition		
Shearing force distribution		
Bending moment distribution		
Cores collapsed	Occurs	None

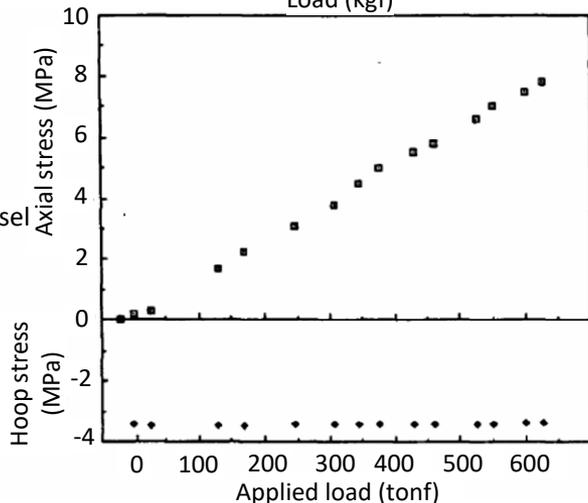
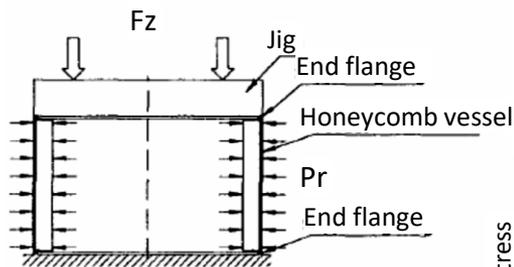
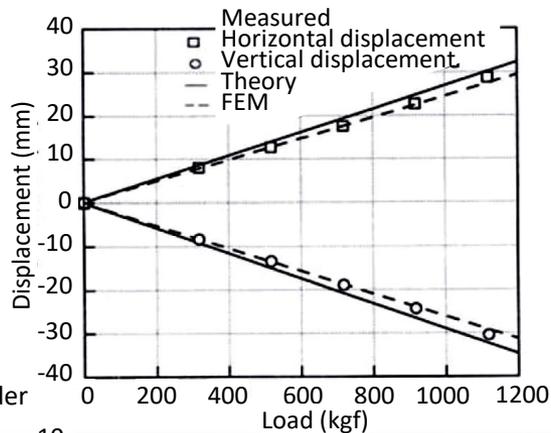
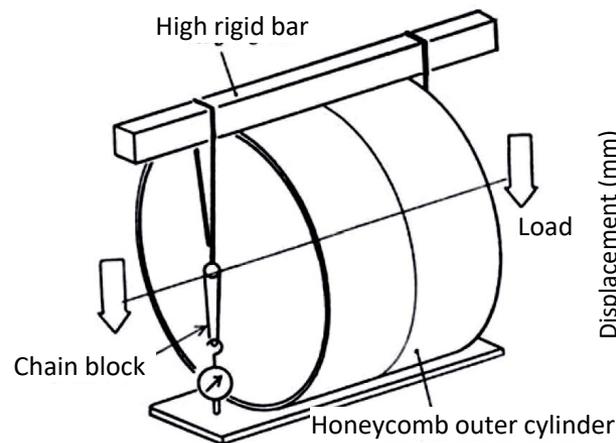
I. Ohno et al., "Brazed honeycomb vessel r&d for the SDC solenoid magnet," Supercollider 5, New York, 1994

H. Yamaoka et al., "Development of a brazed-aluminum-honeycomb vacuum vessel for a thin superconducting solenoid magnet," Adv. Cryogenic Eng., Vol. 39, p.1983, 1994.

# クライオスタット-真空容器外筒(2)

ハニカム円筒は理論通りの剛性を示した。

- E. H. Baker et. al.; "Structural Analysis of Shells," McGraw-Hill Book Company
- "Buckling of thin walled circular cylinders," NASA SP-8007, 1968.

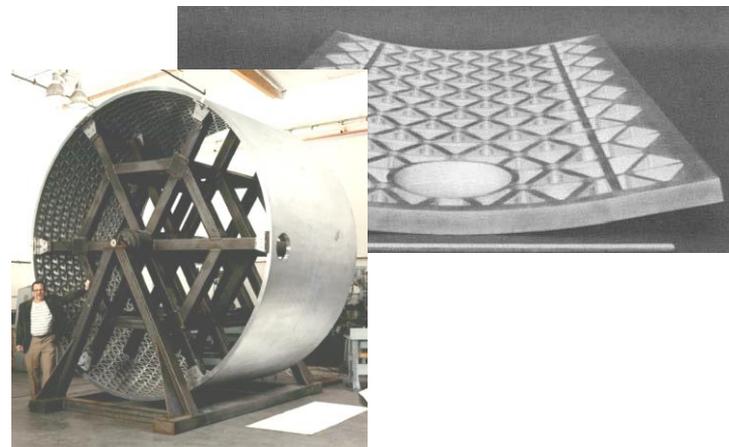


アイソグリッド構造。

- ハニカムには及ばないものの曲げ剛性を確保しながら物質量の低減。
- 端部フランジやサポートの取り付け座、配管貫通部などはアイソグリッド構造で、それ以外はハニカムでという適材適所。

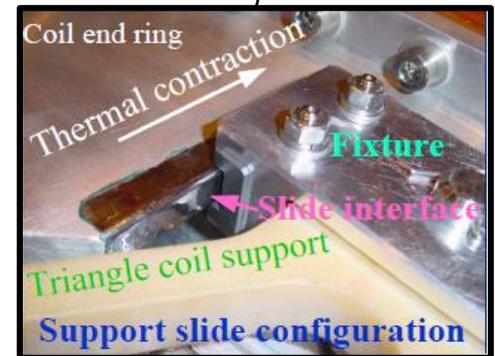
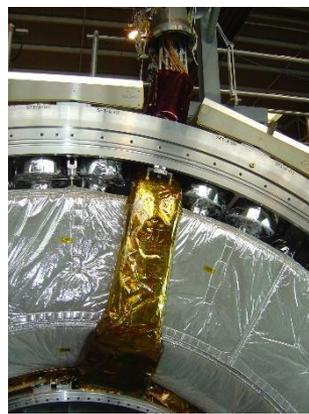
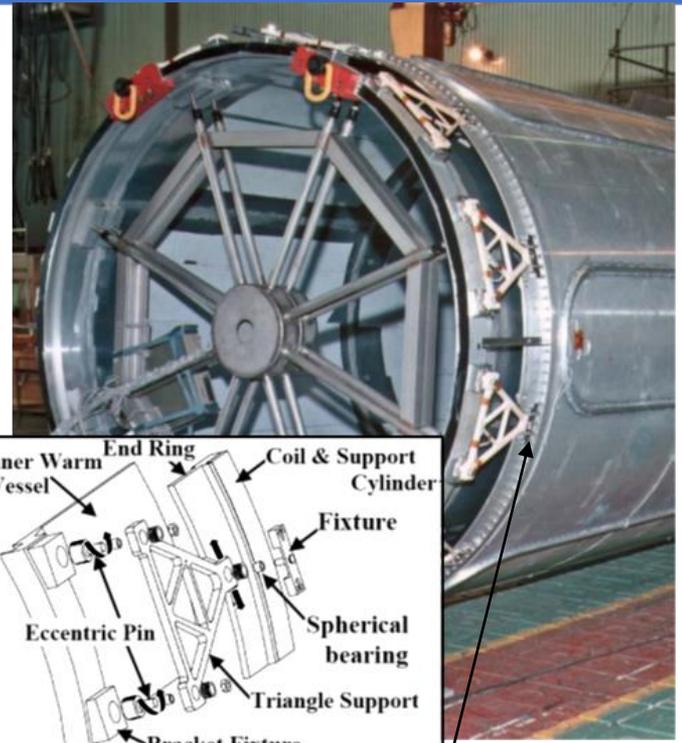
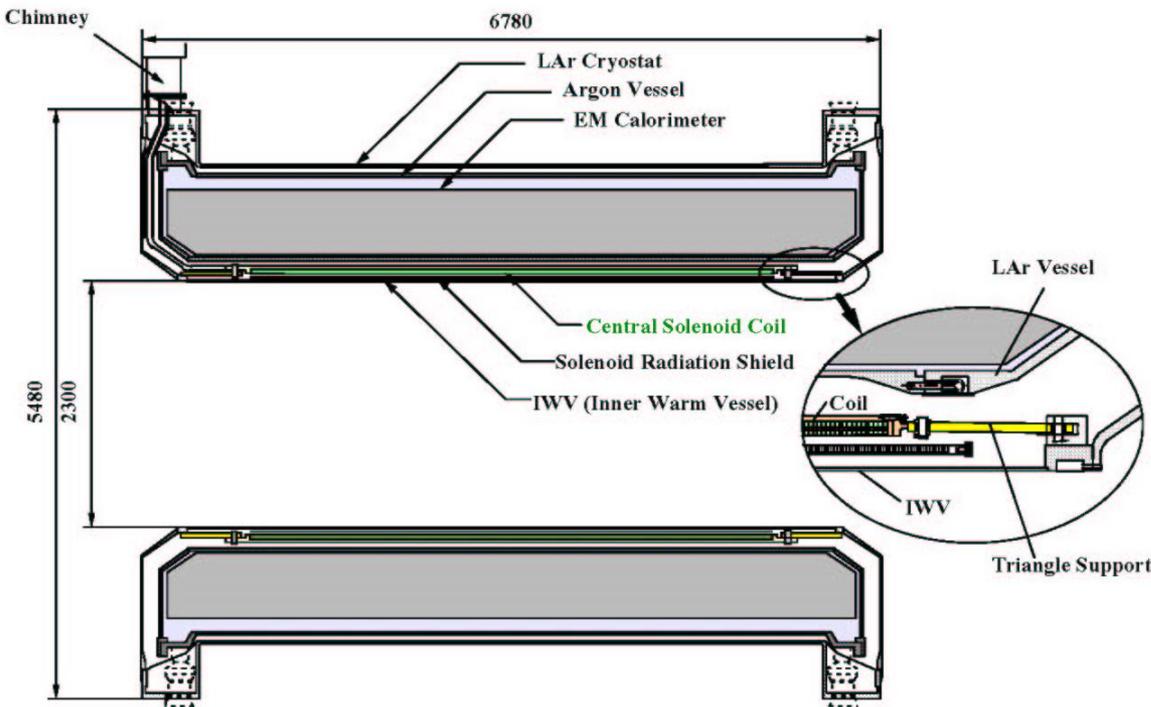
CFRPやGFRP高分子材料

- VENUSなどでの実績があり



Type	厚板	アイソグリッド	ハニカム
材料	5083	5083-H32	6951/4045-T6
全厚(mm)	27	46	46
表面厚 (mm)	(27)	4.0	3.0+3.0
実効厚 (mm)	27	11	7
相対重量	1	0.4	0.26
輻射長 (Xo)	0.303	0.123	0.079

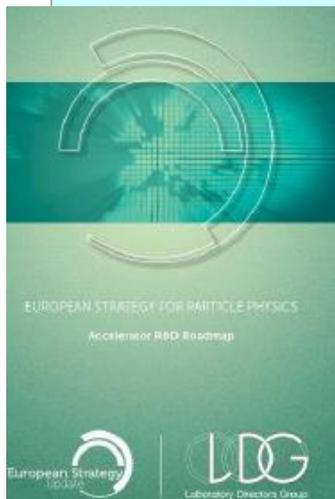
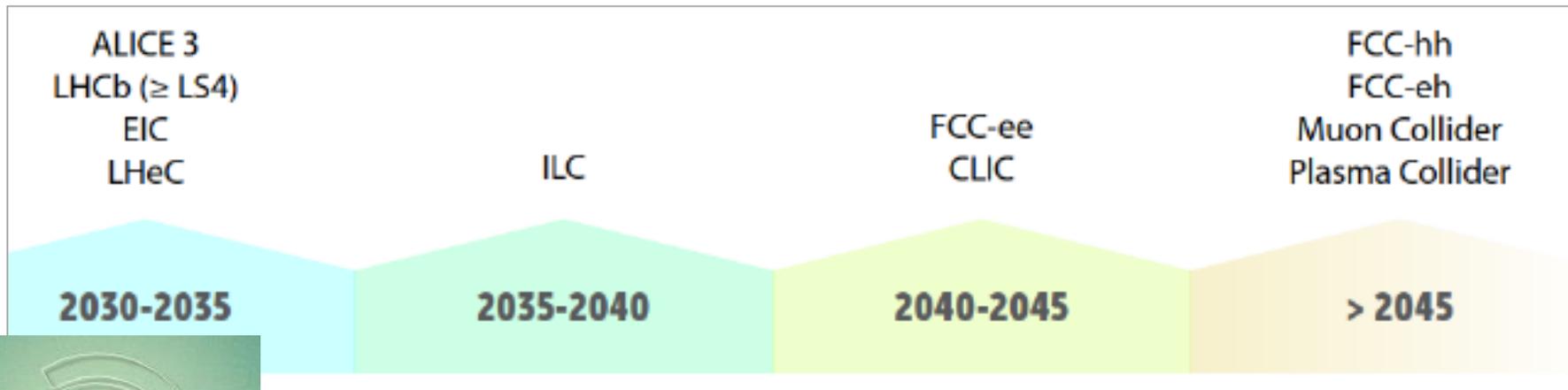
# クライオスタット-真空容器外筒の省略



# 目次

1. マグネットスペクトロメーターの基礎
2. マグネットスペクトロメーターの特徴、タイプ
3. 薄肉ソレノイドをめざした技術開発
  1. 指標E/M比
  2. アルミ安定化超伝導線
  3. コイルの製作（直接内巻き）
  4. 伝導冷却コイル構造
  5. クエンチ保護
  6. クライオスタット
- 4. 将来計画**

# 将来計画の検出器磁石(EF領域)

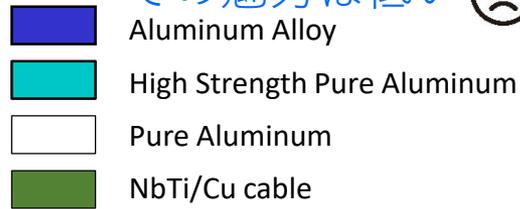


European Strategy  
Laboratory Directors Group

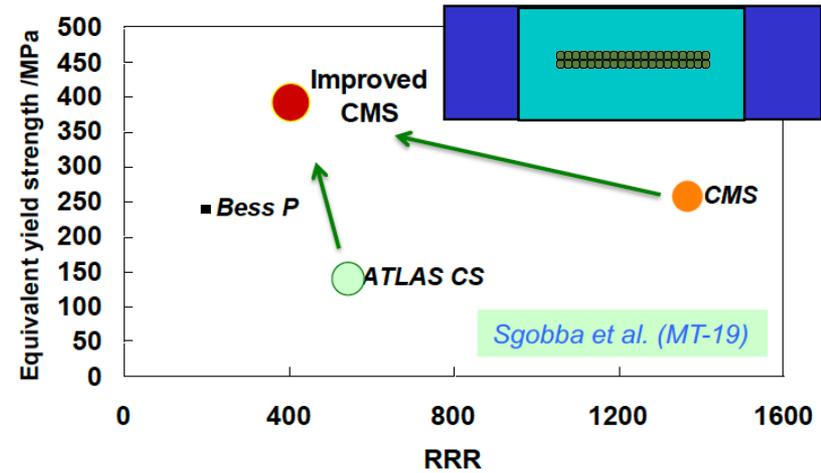
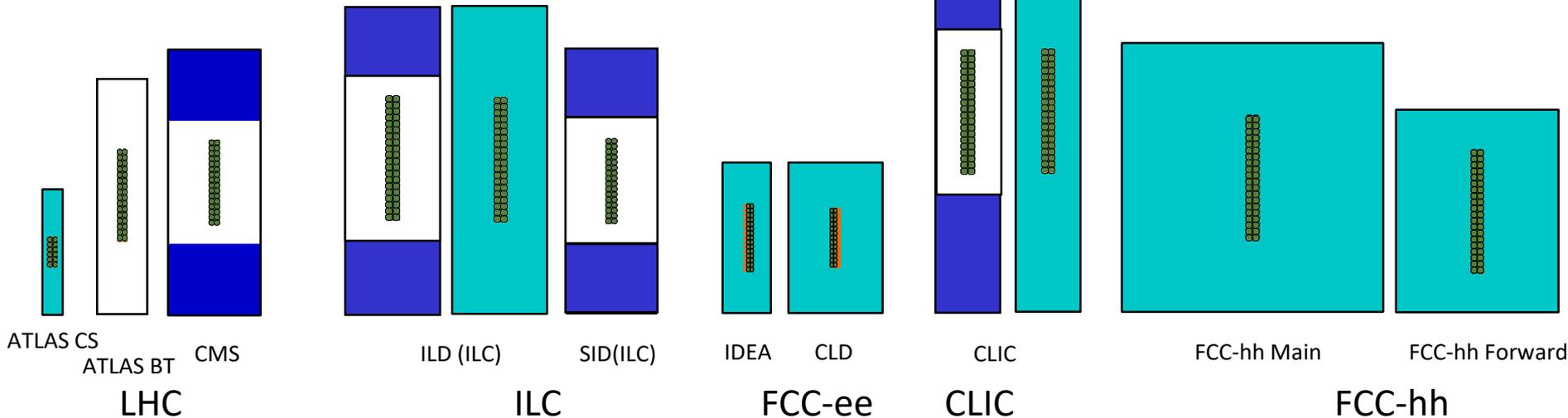
Projects	Energy (GeV)	Magnet	$B_0$ (T)	Inner D (m)	Length (m)	E/M (kJ/kg)	Stored Ene. (GJ)
ILC	250-500	ILD	4	7.2	7.35	13	2.3
		SID	5	5.0	5	12	1.4
CLIC	380 $\rightarrow$ 3000	CLICdet	4	7.3	7.8	13	2.3
FCC-ee	88-95 $\rightarrow$ 365	IDEA	2	4.5	5.8	14	0.17
		CLD	2	8.5	7.2	12	0.6
FCC-hh	100 TeV		4	10	20	11.9	13.8

# 将来計画の検出器磁石の線材

- 強化純アルミ + アルミ合金補強で 400 MPa の引っ張りき強度の線材を目指す。
  - 合金を AW-7020
  - 大断面の同時引き抜き加工可能か？**
    - 試作時に失敗
    - メーカーの協力-関心薄？市場としての魅力は低い 😞



10 mm

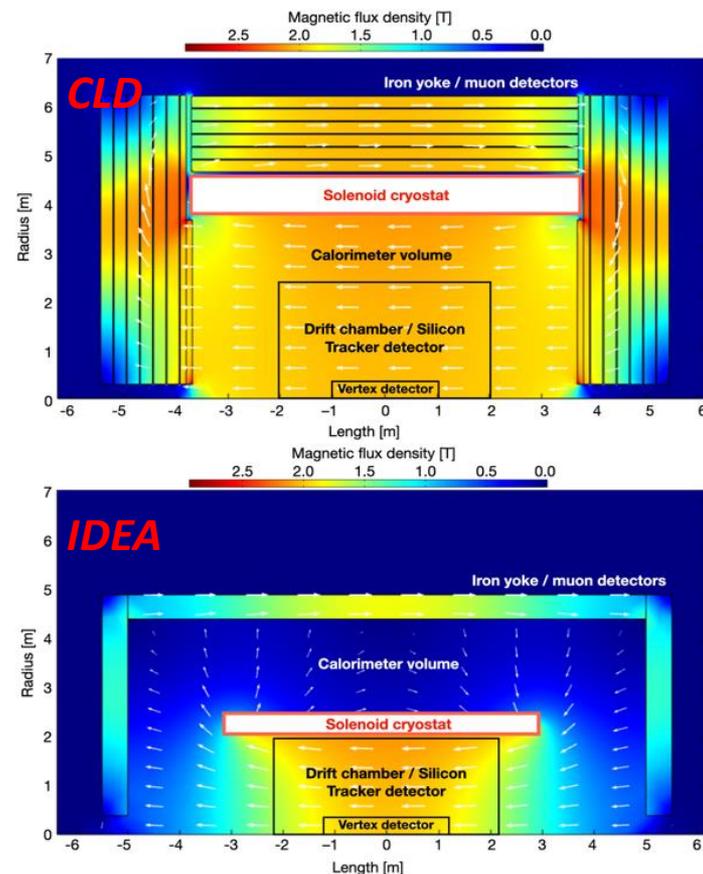


# 将来計画の検出器磁石 薄肉・軽量の視点

- FCC-eeで検討されている2種類の検出器磁石の例

	$B_0$ (T)	内半径(m)	長さ(m)
CLD	2	4.02	7.2
IDEA	2	2.24	5.8

- コスト、特に線材分の増大を抑える。
  - 薄肉化を生かして、本来磁場を必要とするトラックのサイズに内半径をとどめる。
  - 軽量化による支持構造の簡素化。
  - コスト減**



# 講義のまとめ

検出器用超伝導電磁石について、その役割、特徴及び主要な技術要素について解説した。

- 荷電粒子の運動量、極性の判定に利用する磁場空間を提供。
- ソレノイド型、ダイポール型、トロイダル型がある。
- 共通して: 広い粒子検出用室温磁場空間 $BL_0^2$ の確保、広い立体角のコイル。
- 特にEnergy Fronterの衝突型実験には有効立体角 $4\pi$ のソレノイド型が開発されてきた。  
薄肉ソレノイドタイプ。

## 薄肉ソレノイドの技術要素

- 粒子散乱最小化、物質量の最小化。
- アルミ被覆による高い安定化材比を持つNbTi超伝導線で巻かれた伝導冷却コイル。
- 高速常伝導伝播や強制ヒーター常伝導転移によるクエンチ保護。
- 真空容器外筒の透明性向上。

今後、Energy Fronter加速器実験に向けた巨大な検出器磁石に向けた技術要素開発に取り組む一方、小型冷凍機を使用した身近な検出器磁石の普及にも貢献したい。