

超伝導電磁石加速器応用全般

高性能で効率的な加速器を実現する先端技術



CERN LHC

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現（有本、鈴木）
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史（中本、大内、つくば見学）
- ハドロン加速器での応用（中本、阿部、吉田、飯尾、奥野、水島、東海見学）
- 電子加速器（大内、つくば見学）
- 検出器磁石（楳田、つくば見学）
- 将来計画（菊池、飯尾）
- まとめ
- 極低温技術（中西、木村）

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

超伝導応用 (加速器以外)

超伝導の特徴
抵抗ゼロ、高電流密度、高磁場



発電機

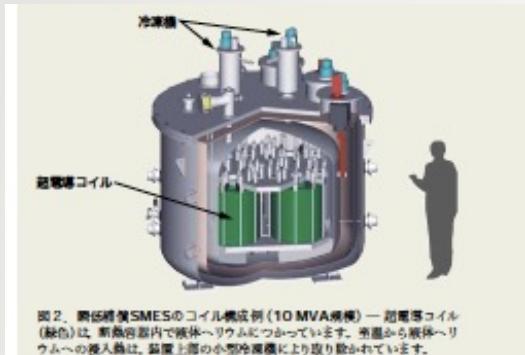
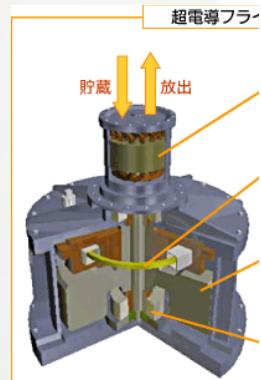


図2. 超伝導SMESのコイル構成例(10 MVA規模) — 超電導コイル(緑色)は、断熱容器内で液体ヘリウムにつながっています。热量から液体ヘリウムへの熱入射は、蓋部上部の小型冷媒機により取り除かれています。

SMES

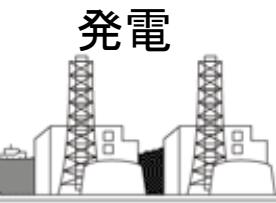
蓄電



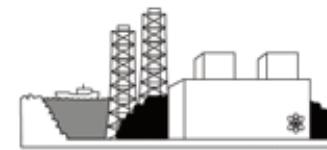
フライホイール



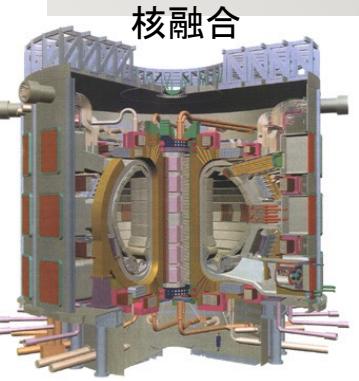
水力発電所



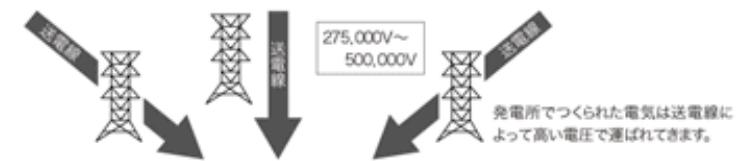
火力発電所



原子力発電所



核融合

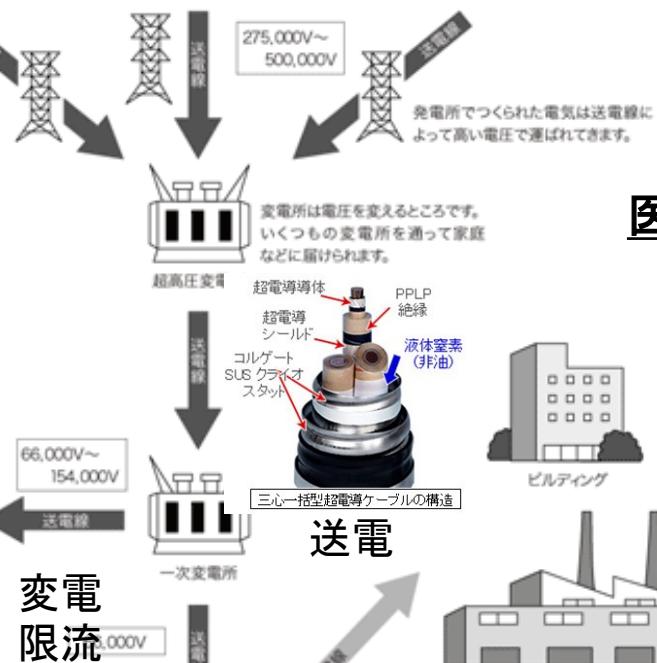


発電所でつくられた電気は送電線によって高い電圧で運ばれてきます。

医療
MRI

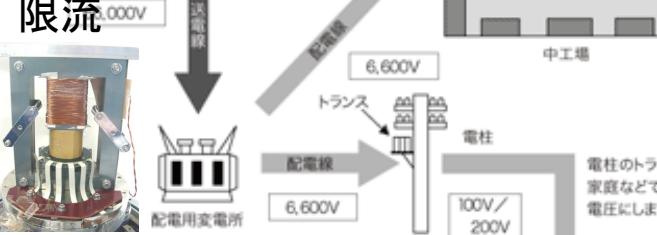


半導体
MCZ



送電

変電
限流



電柱のトランスは、電気を家庭などで安全に使える電圧にします。



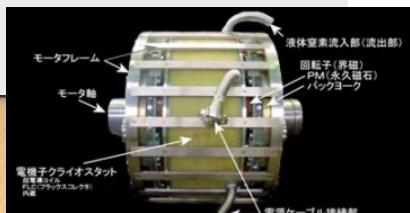
分析
NMR



輸送
リニア
新幹線

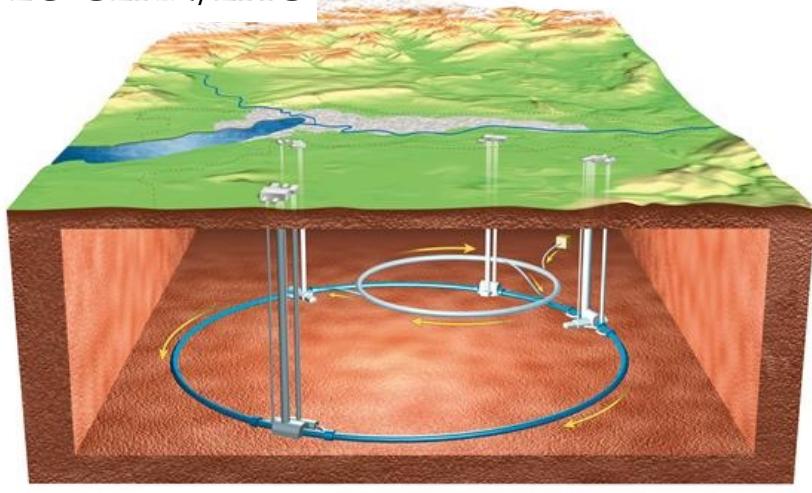


モーター

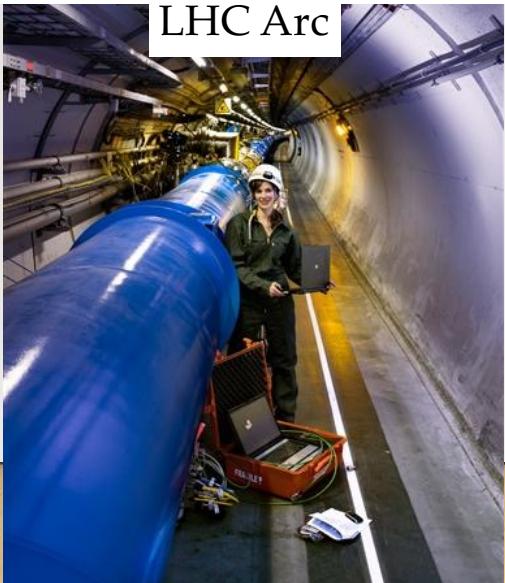


加速器における 超伝導電磁石応用

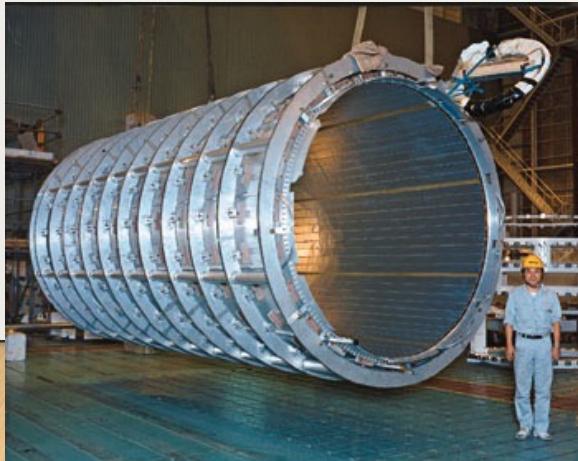
EU CERN/LHC



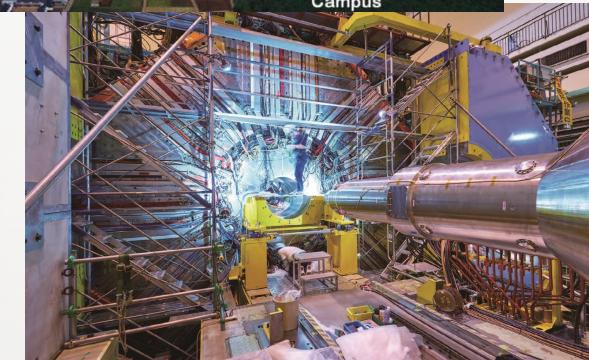
LHC Arc



ATLAS Solenoid



Japan
J-PARC
Neutrino
Beamline



Japan
SuperKEKB
QCS
Belle2 Solenoid



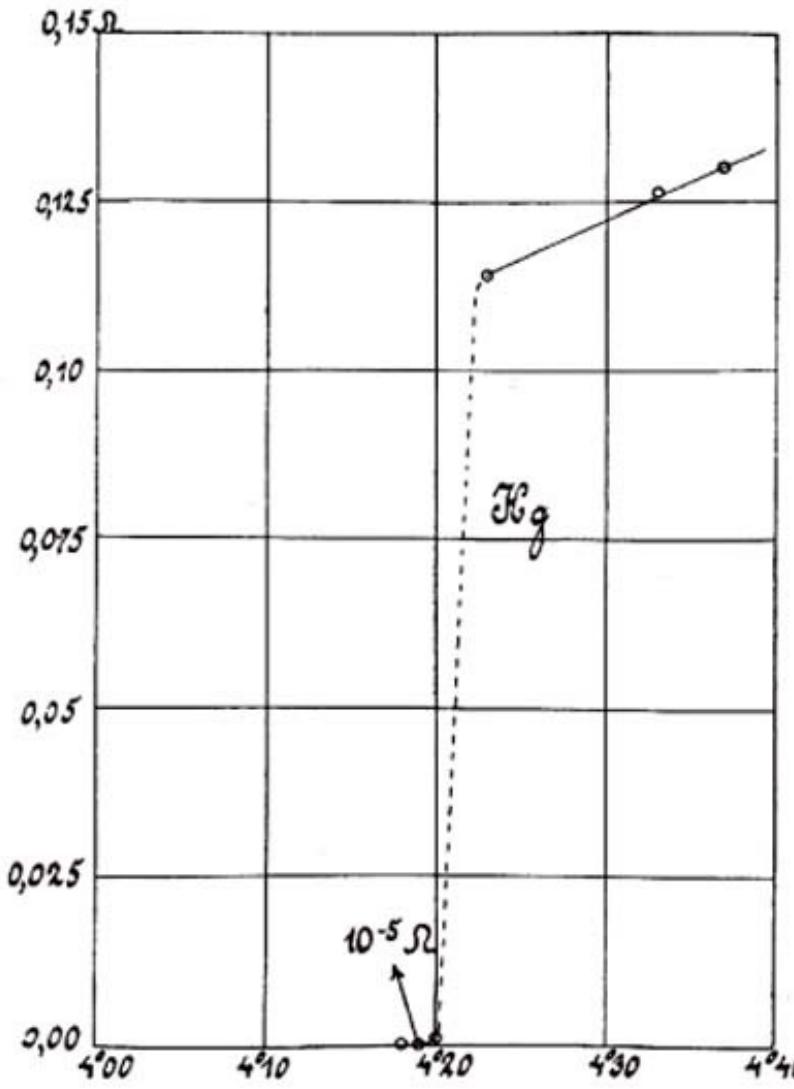
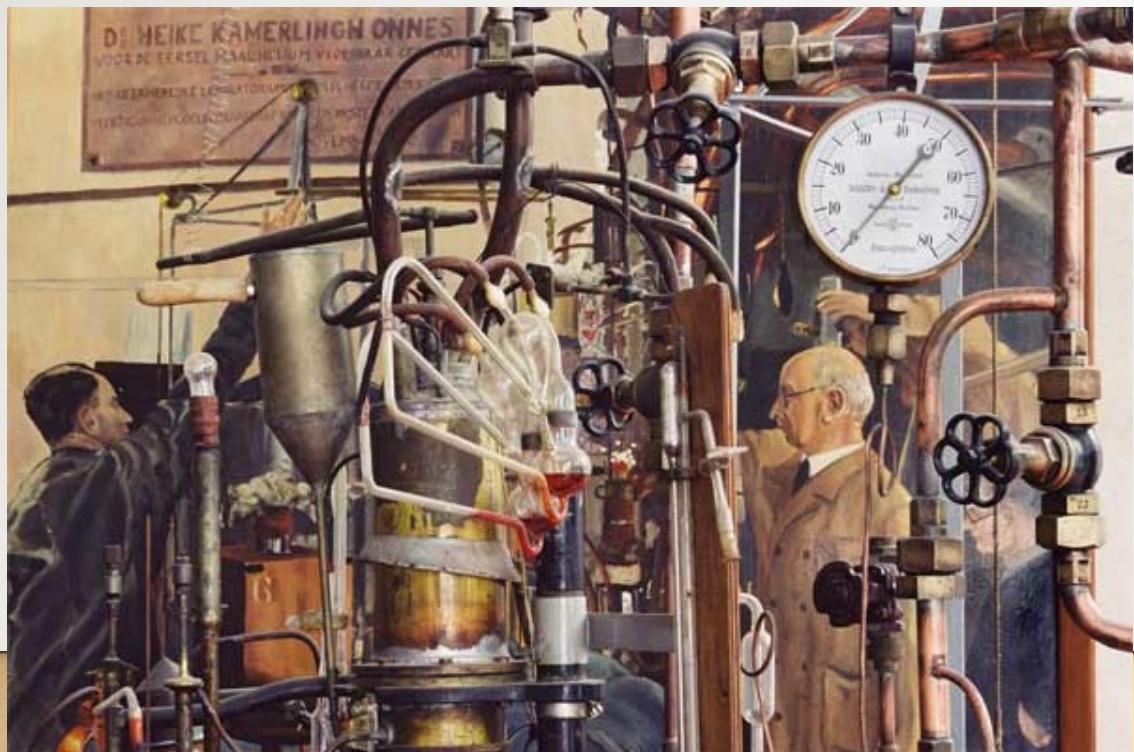
USA FNAL/Tevatron



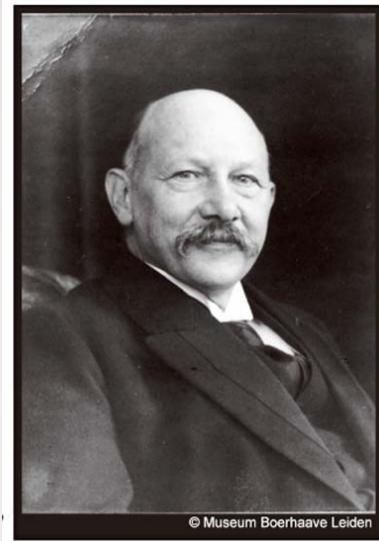
- はじめに
- **超伝導の発見と超伝導電磁石の実現**
 - 超伝導の発見
 - 超伝導現象の理解の進展
 - 実用超伝導電磁石の実現に向けて
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

1911年 超伝導発見!

- 1908年液体ヘリウムの液化
- 1911年4月8日水銀の超伝導発見
- 1913年10T鉛磁石開発の提案
→断念(臨界磁場:0.08T)



<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/cold/cold.html>



Heike Kamerlingh Onnes
(1853-1926)

1933年 マイスナー効果

Fritz Meißnerと

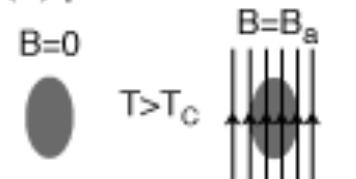
Robert Ochsenfeld

によって発見

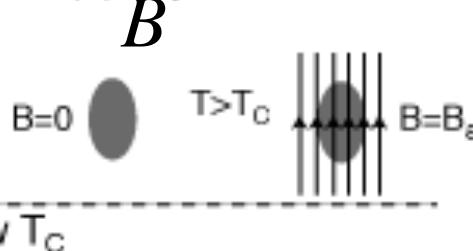
完全反磁性



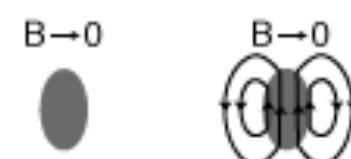
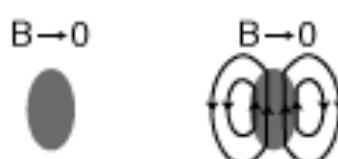
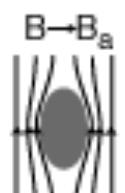
(a) perfect conductor



(b) superconductor



cool below T_c



Fritz Walther Meißner (1882 – 1974)

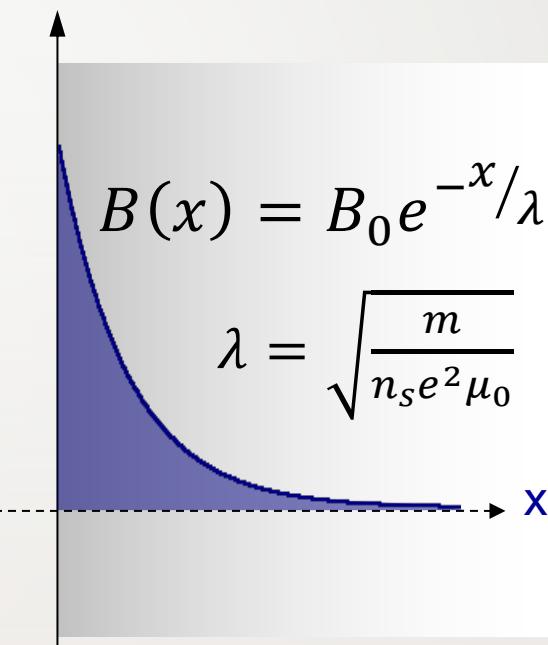


Robert Ochsenfeld (1901-1093)

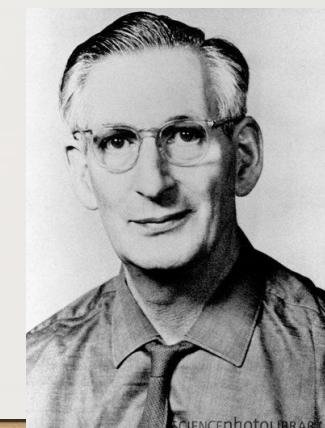
1935年 ロンドン侵入長

ロンドン兄弟によって導出

マイスナー効果の現象論的説明



Fritz London (1900-1954)



Heinz London (1907-1970)

1937年 Shubnikovの悲劇

- 1935 : TypeII超伝導体の混合状態
Shubnikov Phaseを発見
- 1937 : スパイ容疑で逮捕、11月に処刑
 - スターリン大肅正
 - 学術的功績も消される
- 1957 : 名誉回復



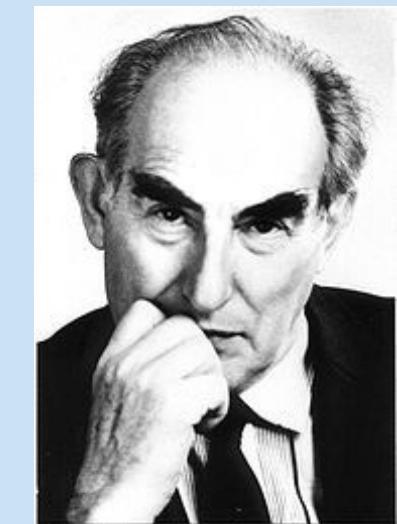
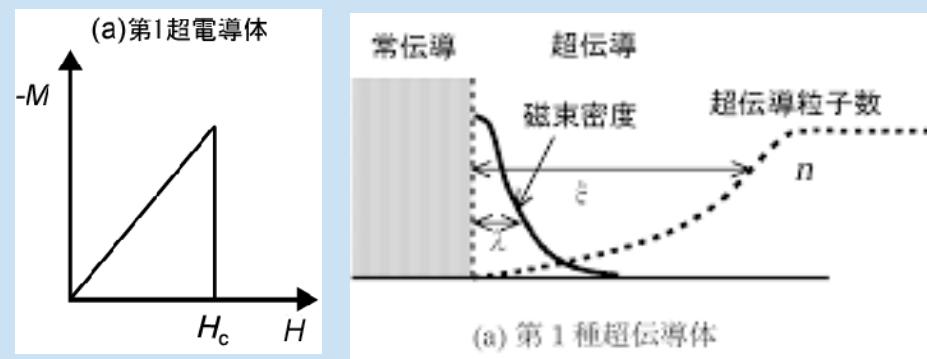
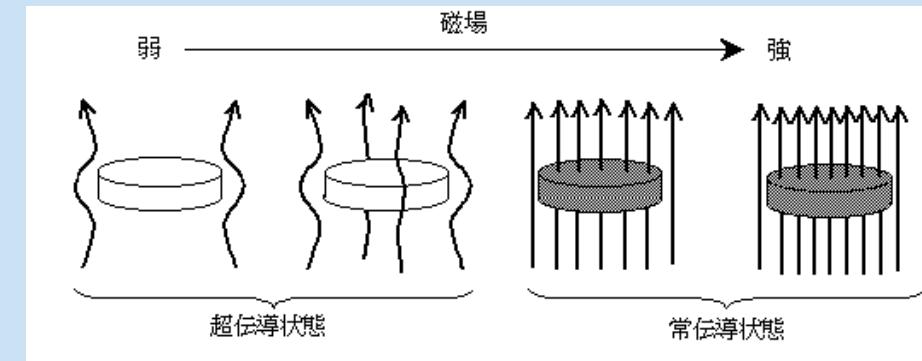
Lev Vasilievich Shubnikov
(Sep.9 1901~Nov.10 1937)

1950年 GL理論 第1種超伝導体

- ロンドン理論の補完

- コヒーレンス長

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar}{2m|\alpha|}}, \quad \alpha = \frac{(\mu_0 e \lambda H_c)^2}{m}$$

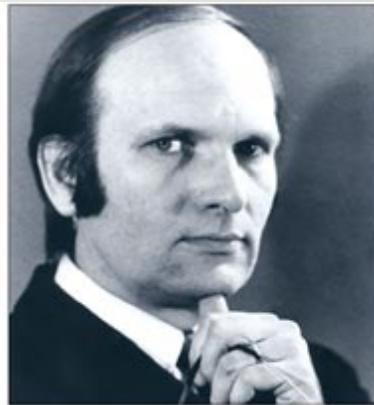
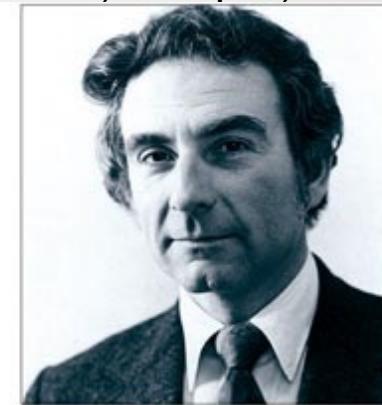


Vitaly Lazarevich Ginzburg
(1916~2009)



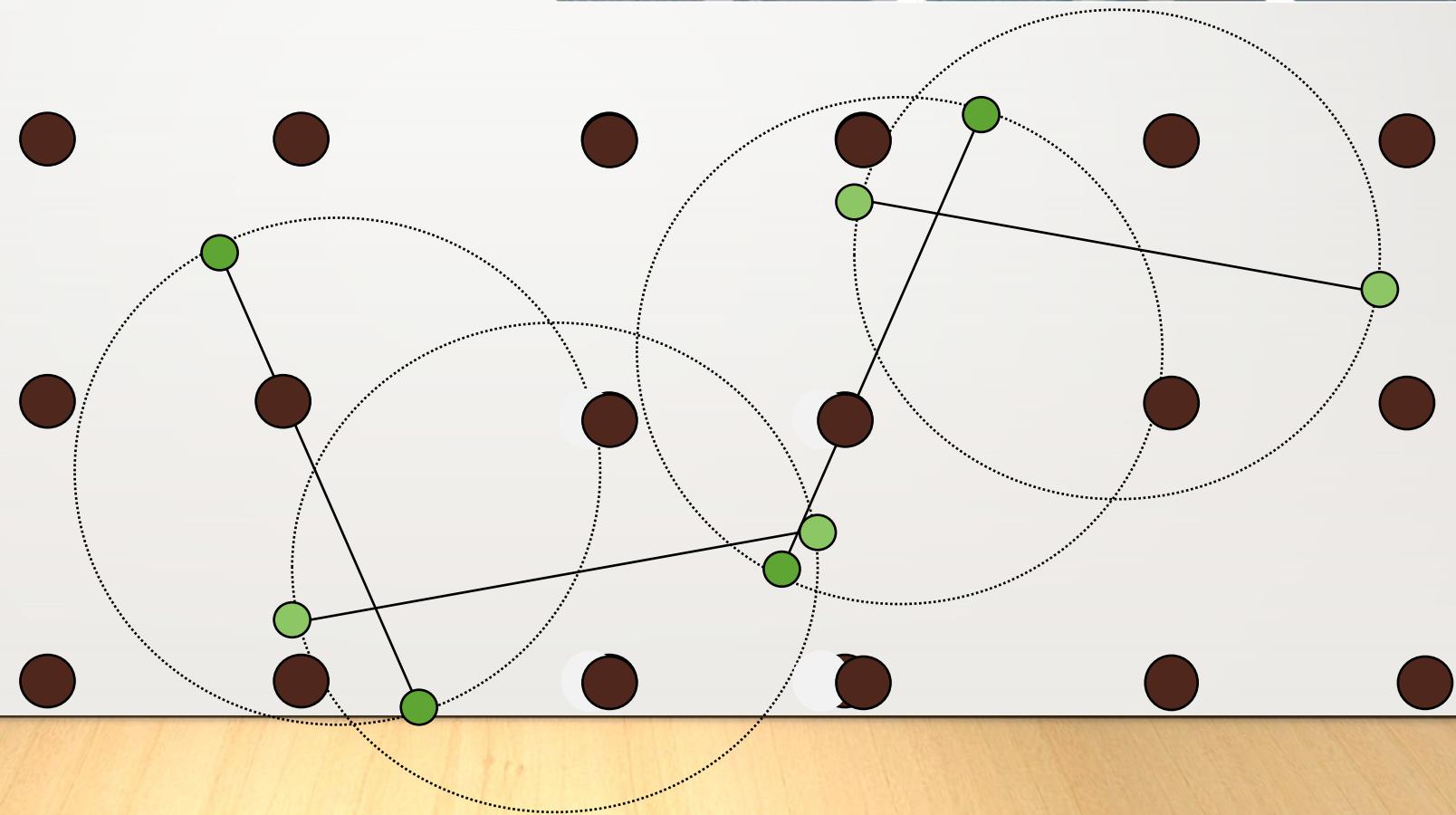
Lev Davidovich Landau
(1908~1968)

Bardeen, Cooper, Schrieffer



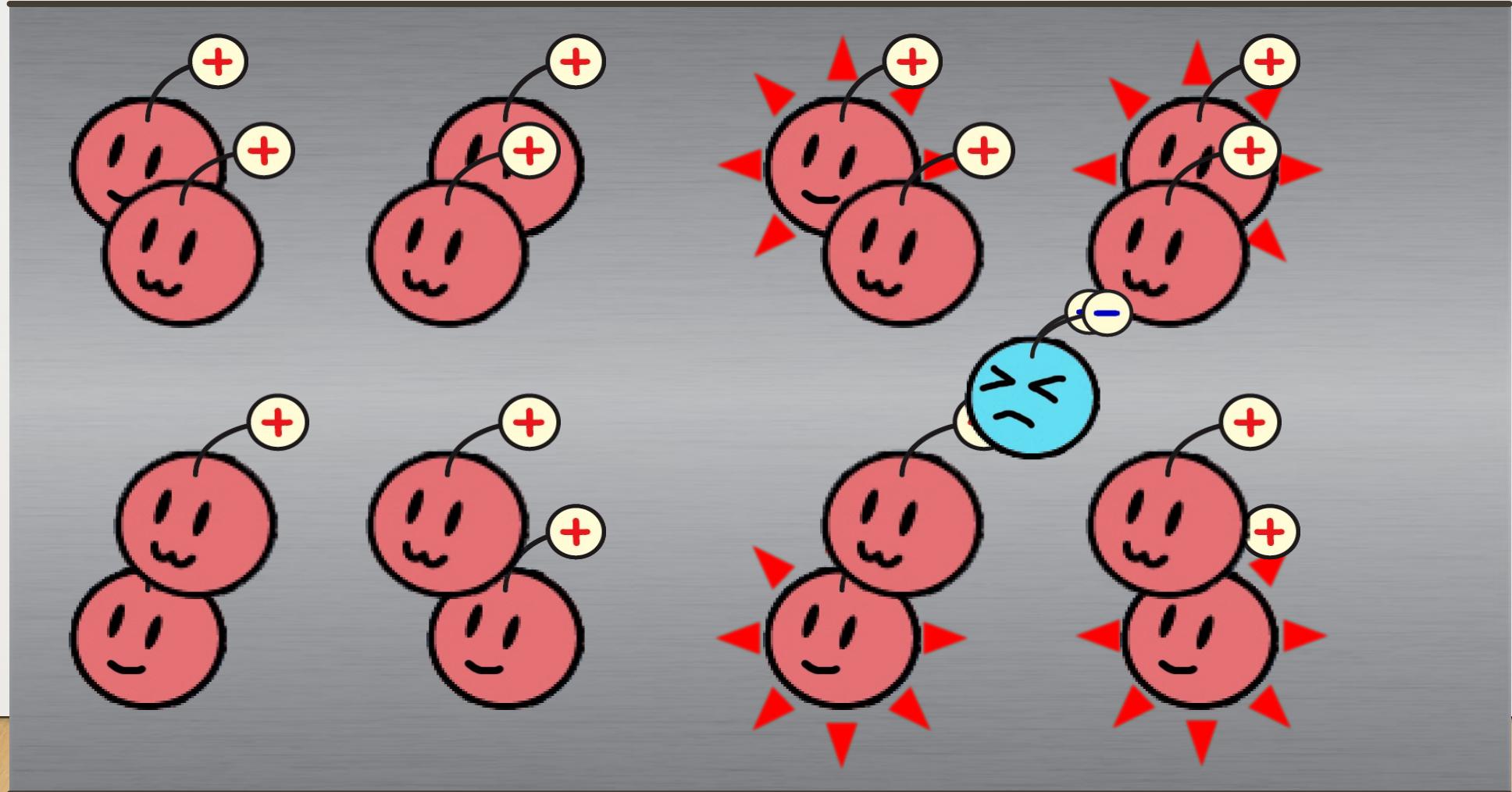
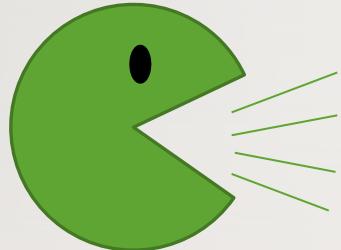
11 | 1957年 BCS理論

- クーパーペアをもとに構築

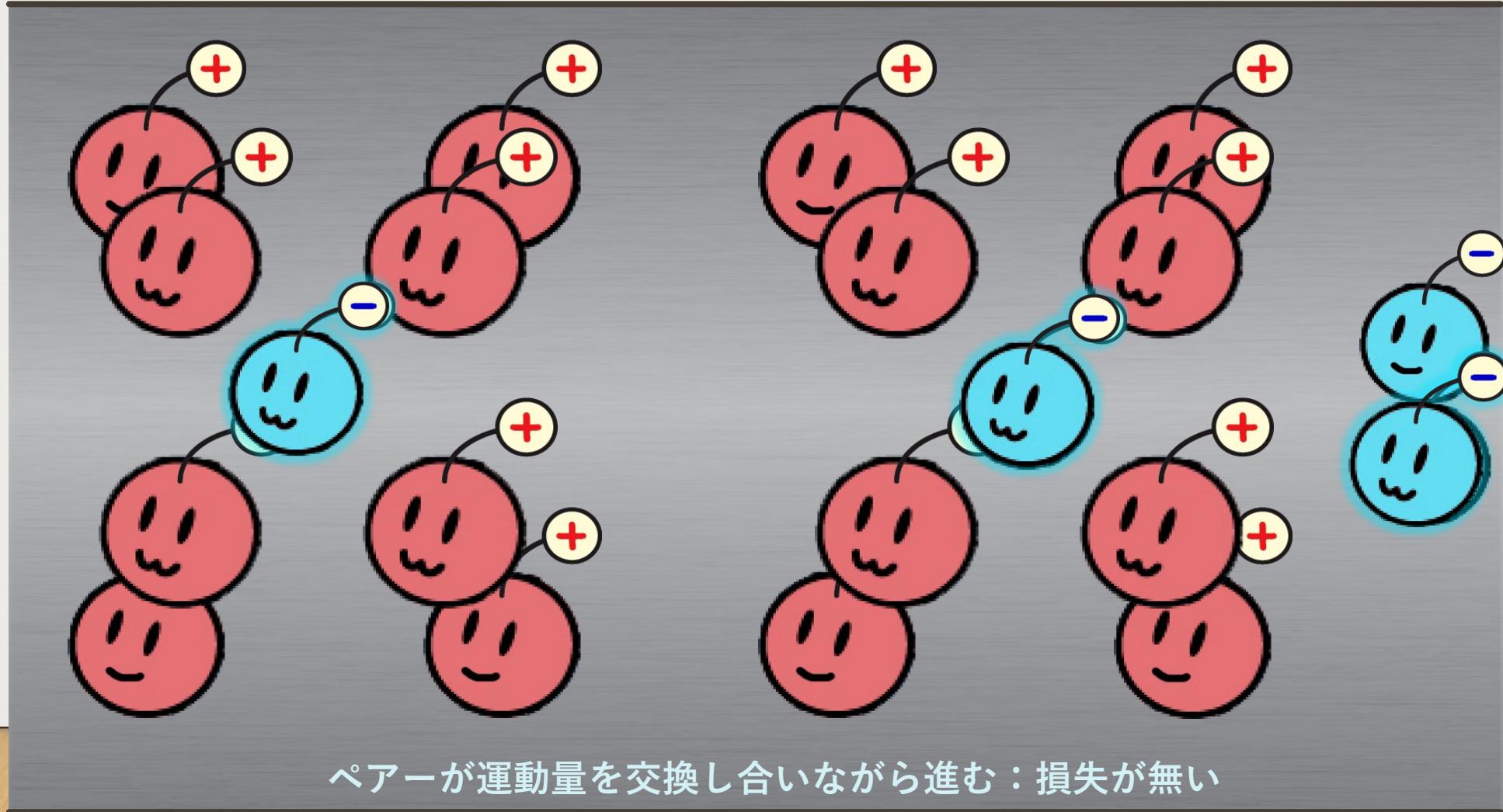
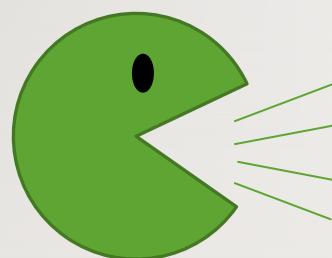


$$W = VI = RI^2 : \text{電気抵抗による発熱}$$

$$V = RI$$

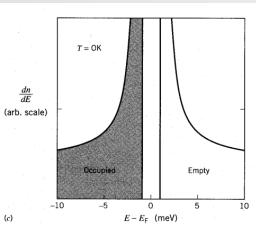
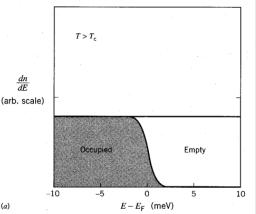


超伝導（クーパーペア）



ペアが運動量を交換し合いながら進む：損失が無い

ボーズアインシュタイン凝縮 リア充クーパーペアたちの談合



- クーパーペア（電子対：ボソン）がボーズアインシュタイン凝縮する
 - 全てのクーパーペアの運動量が同じ
(電子はフェルミオンなのでバラバラ)
 - 大きなエネルギーギャップができる Δ_0
- Cooper対のサイズ
=コヒーレント長： $\xi_0 = \frac{\hbar v_f}{\Delta_0}$
- Pippardのコヒーレント長
 $1/\xi \sim 1/\xi_0 + 1/l$ l : 電子の平均自由行程

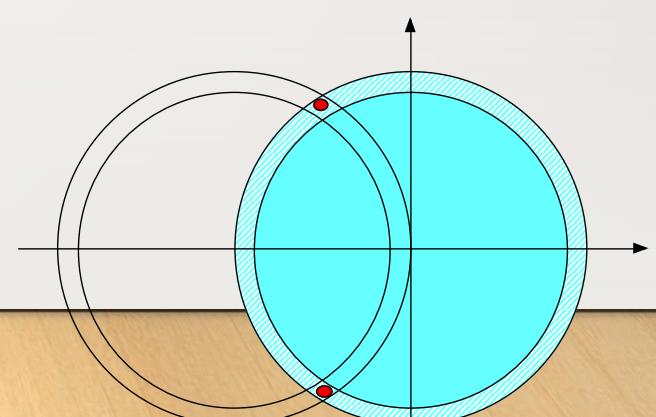
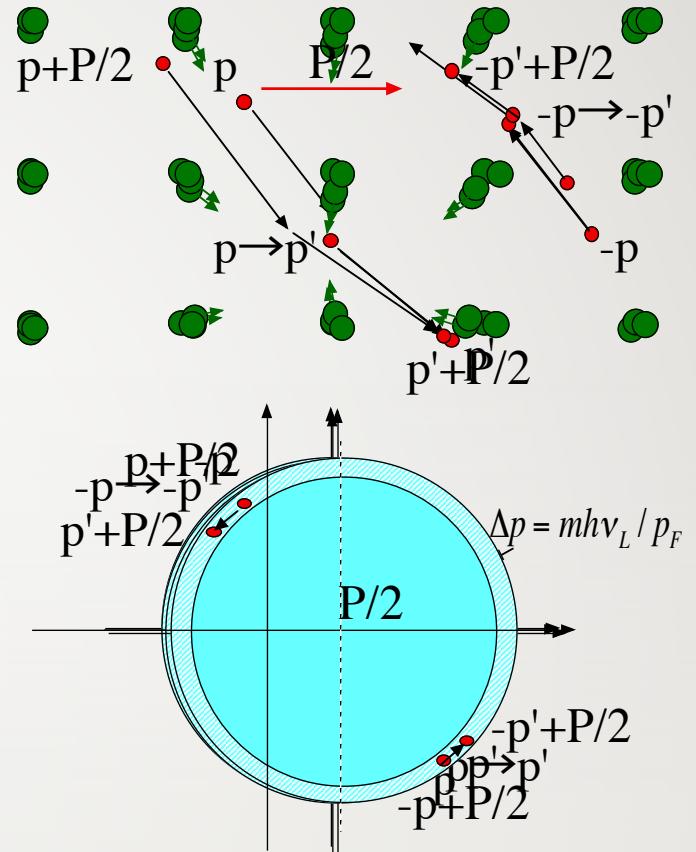


Table 2-1 超伝導体の臨界温度と臨界磁場

種類	材料	Tc	Bc(Be2)
1種	Hg	4.2K	~0.04T
	Pb	7.2K	~0.08T
2種	Nb	9.25K	~0.3T
	NbTi	9.1K	11.5T
	Nb ₃ Sn	18.3K	22.5T

1957年第2種超伝導体

- アブリコソフがGL理論から導出
 $\sqrt{2}\xi < \lambda$
- 超伝導界面エネルギー；負
- 磁束が侵入；混合状態
- 2つの臨界磁界; H_{c1}, H_{c2}

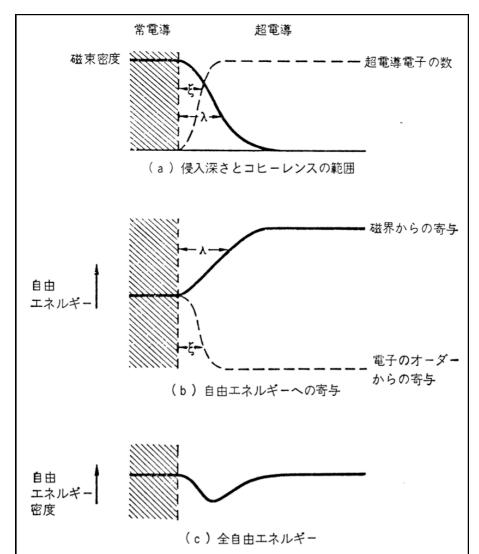


Fig. 2-4 第2種超伝導体の界面 [18]

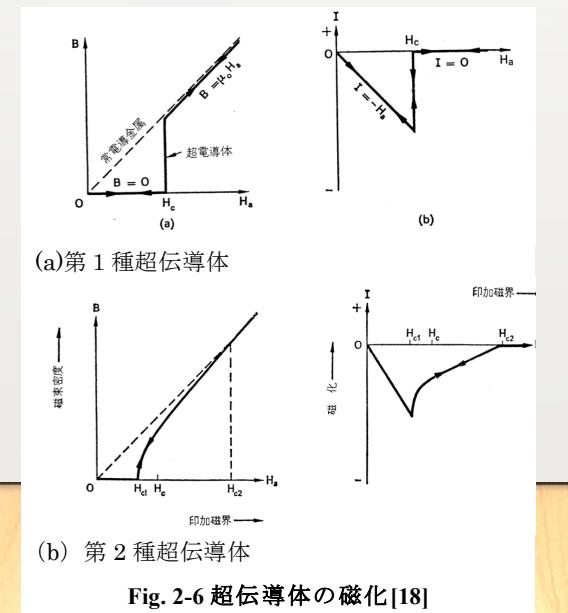


Fig. 2-6 超伝導体の磁化 [18]

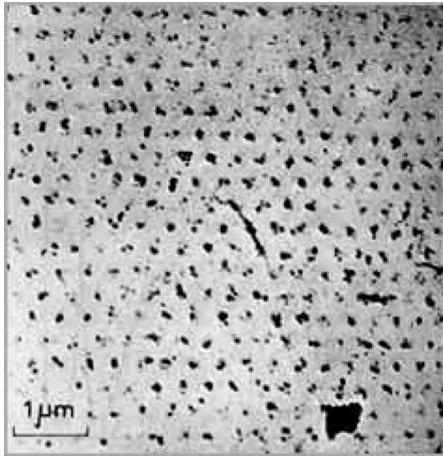
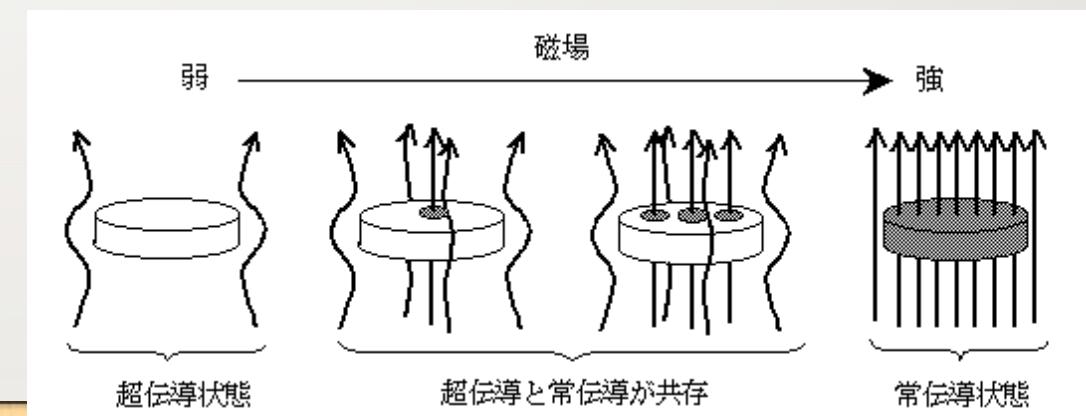


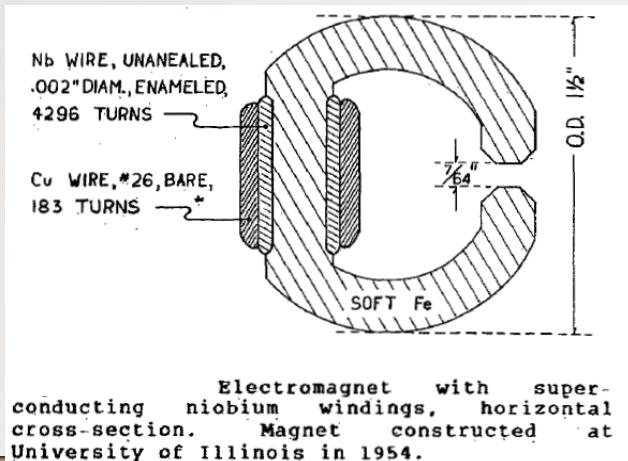
Fig. 2-5 混合状態における磁束 [20]

Alexei Alexeyevich Abrikosov
(1928~)

- はじめに
- **超伝導の発見と超伝導電磁石の実現**
 - 超伝導の発見
 - 超伝導現象の理解の進展
 - **実用超伝導電磁石の実現に向けて**
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

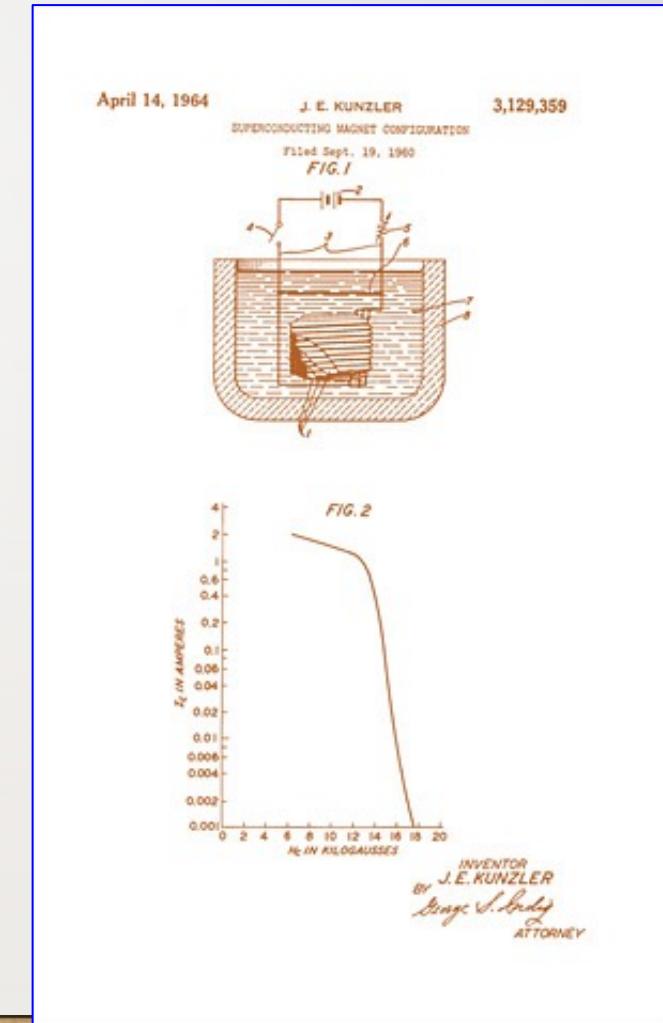
超伝導の歴史 磁石応用の始まり（1960年代）

- 1961 MIT Conference
 - J.E.Kunzler (Bell研): Nb₃Sn 6.8T 勝利!
 - J.Hulm (Westinghouse): NbZr 6T おしい！
- 初めての磁石
 - 1954 G. Yntema 0.71 T



Kunzler:10T Nb₃Sn 磁石
ボスとの約束でスコッチ2ケースゲット！
でも Bell研は超伝導磁石から撤退。。。

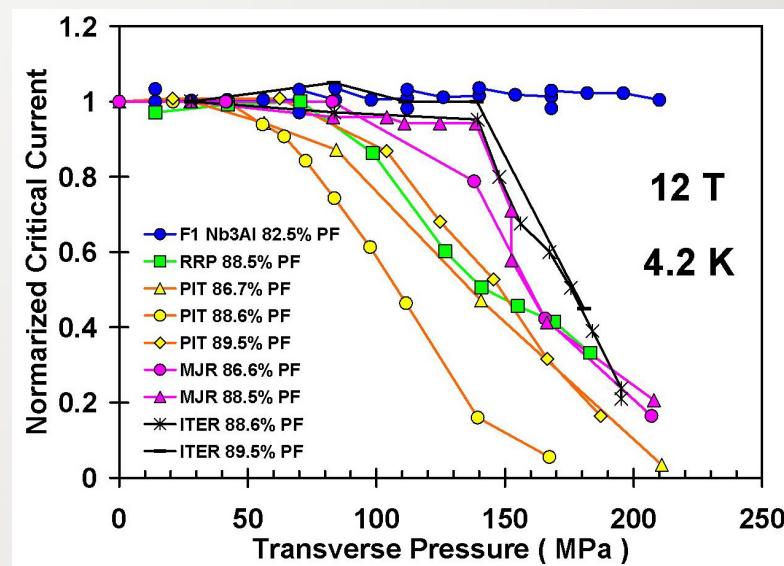
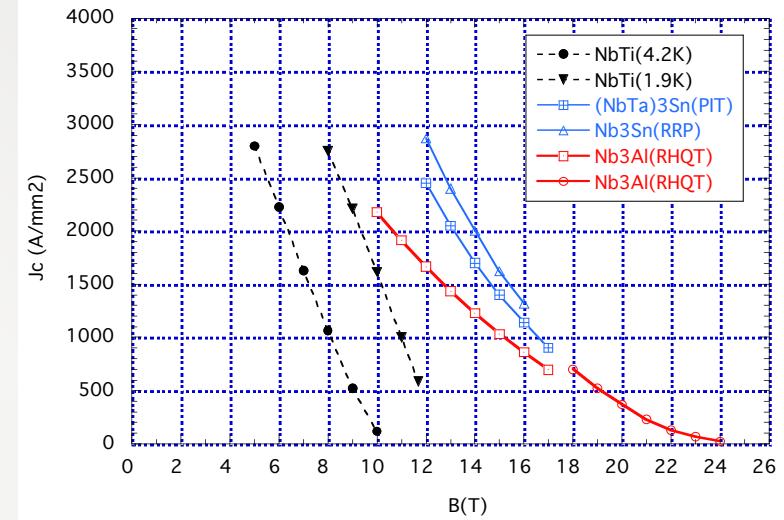
J. Hulm: NbTi 発見！



Kunzlerによる最初の特許

NbTi (合金) 対 Nb₃Sn (化合物)

- 臨界電流特性 : Nb₃Snのが良い
- 機械的特性
 - NbTi : 合金→延性・展性→磁石製造楽
 - Nb₃Sn : もろい、歪で劣化→磁石製造が難しい
- 8T程度までの応用
- NbTi**



超伝導の臨界電流

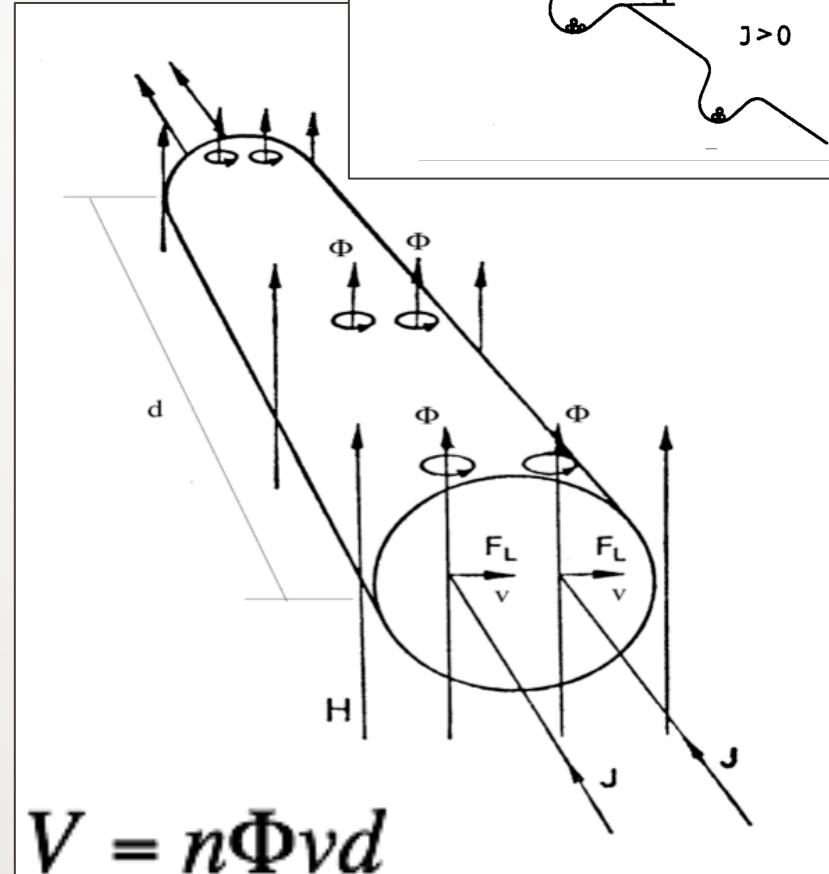
- 磁束フロー状態

- 電磁力で超伝導体内部の磁束が動く
- 電圧が生じ損失が出る
- 磁束を止める必要性

- ピン止め力

- 超伝導体内部に常伝導転移しやすい場所を作りそこに磁束を止める
- ピン止め力を超える電磁力を与える
電流密度 = 臨界電流密度

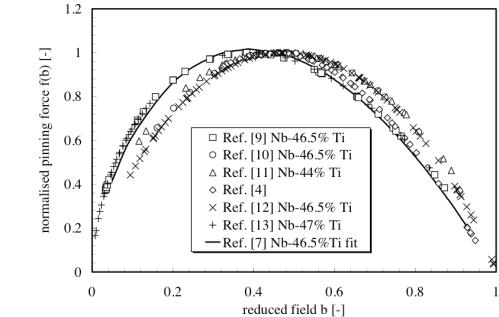
$$V = n\Phi v d$$



Pinning potential

$$F_p = J_c B$$

a) 臨界電流密度から逆算されたピン止め力
横軸は臨界磁場 H_{c2} に対して規格化した値
縦軸はピン止め力の最高値で規格化した値



b) 臨界電流密度

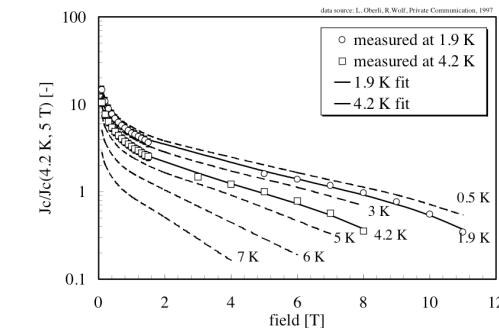


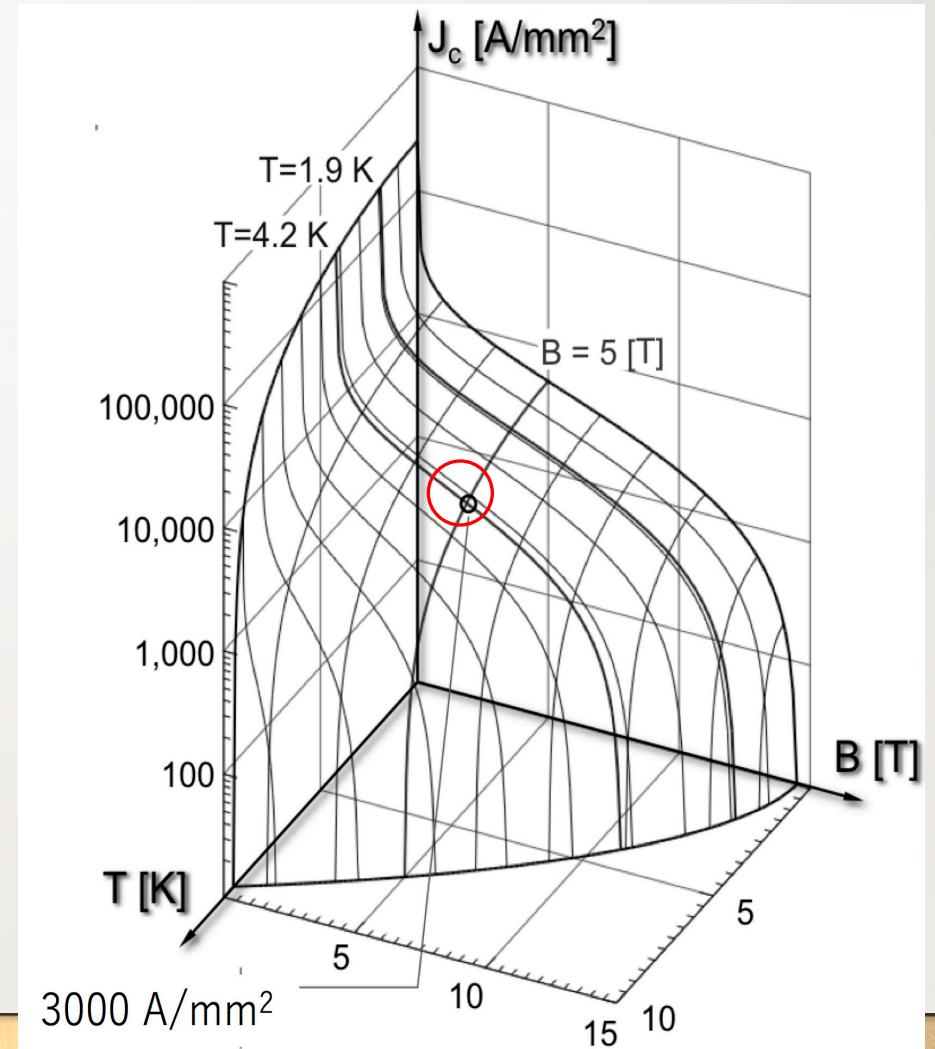
Fig. 2-8 NbTi のピン止め力と臨界電流密度

臨界面

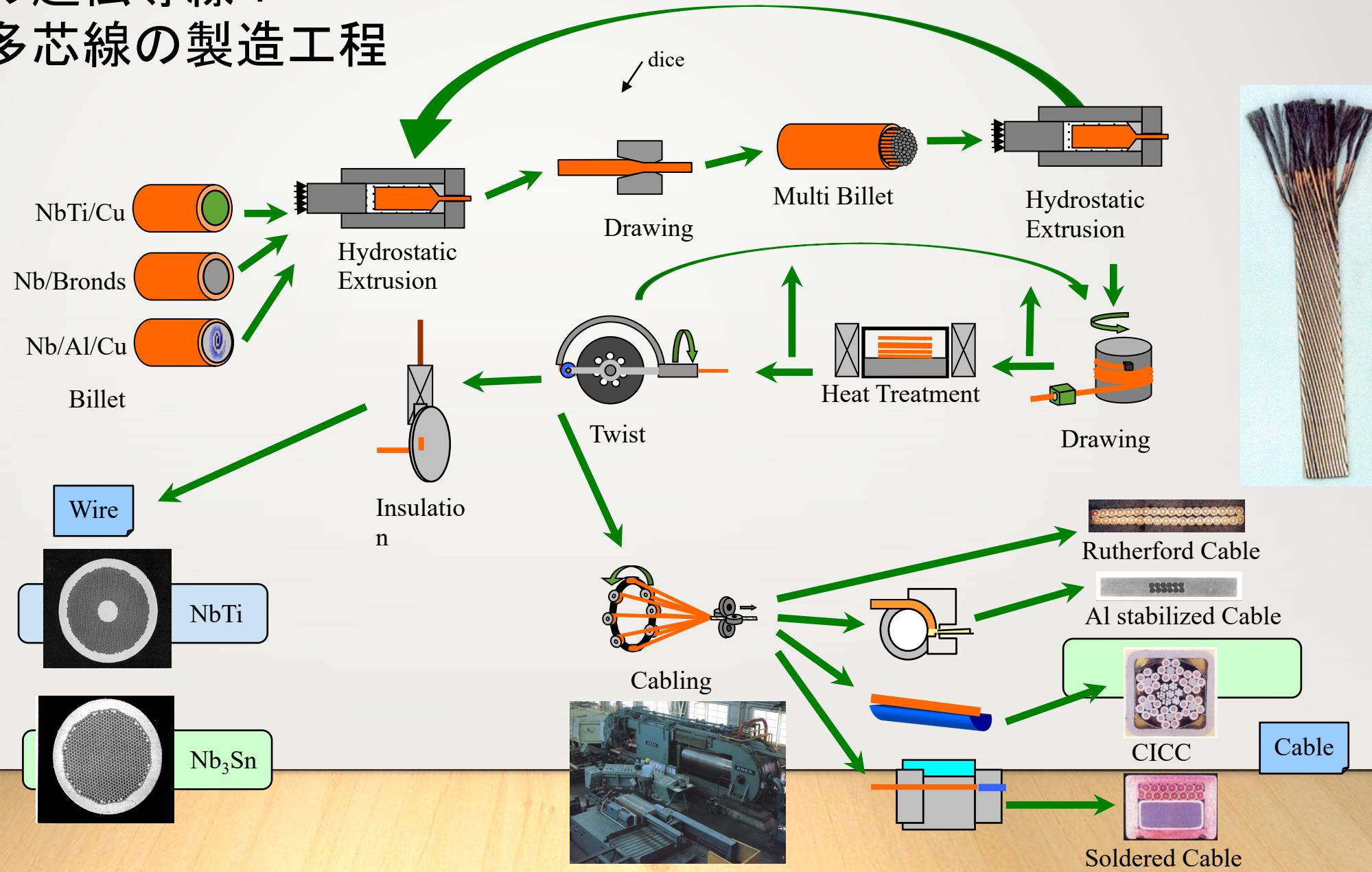
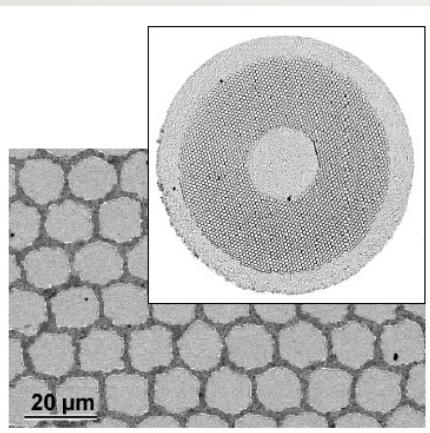
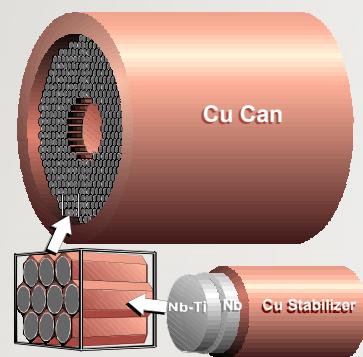
- 臨界電流密度は
 - 温度
 - 磁場
- の関数
- NbTiは4.2K, 5Tで3000A/mm²

$$J_c(B, T) = \frac{J_c^{ref} C_0 B^{\alpha-1}}{B_c(T)} \left(1 - \frac{B}{B_c(T)}\right)^\beta \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{1.7}\right)^\gamma$$

$$J_c^{ref} = 3 \times 10^9 \text{ A/m}^2, B_c(T=0) = 14.5 \text{ T}, \\ C_0 = 27.04 \text{ T}, \alpha = 0.57, \beta = 0.9, \gamma = 2.32$$

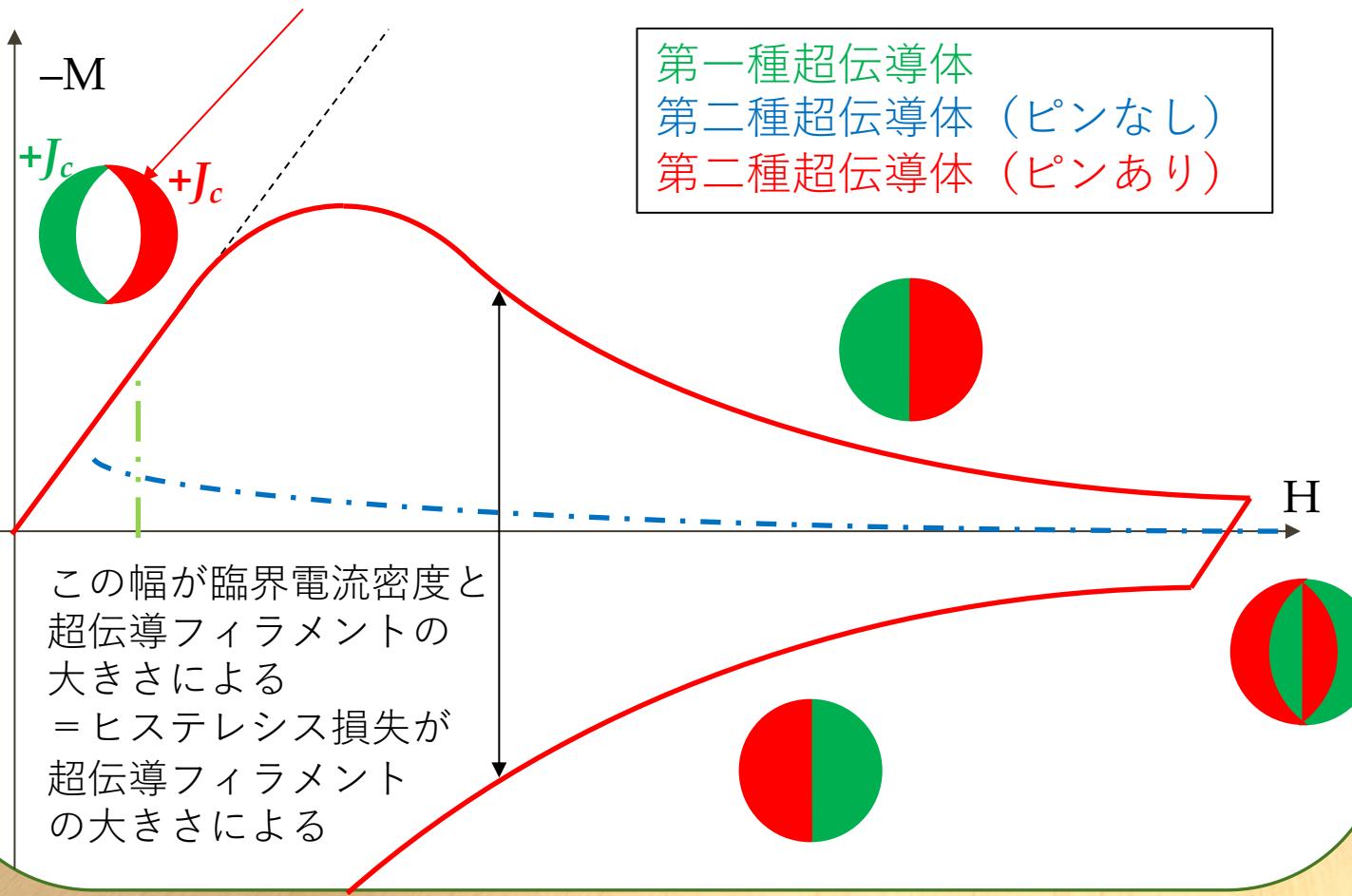


実際の超伝導線： 極細多芯線の製造工程

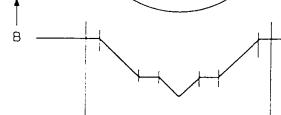
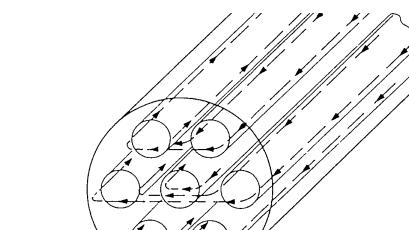
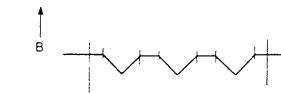
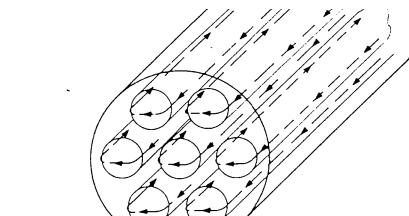


極細多芯線 超伝導体の磁化特性

超伝導フィラメントに臨界電流密度で遮蔽電流が流れる



フィラメント間で非常に長い時定数のカップリングが起きる



ツイストしてカップリングをの時定数を下げる

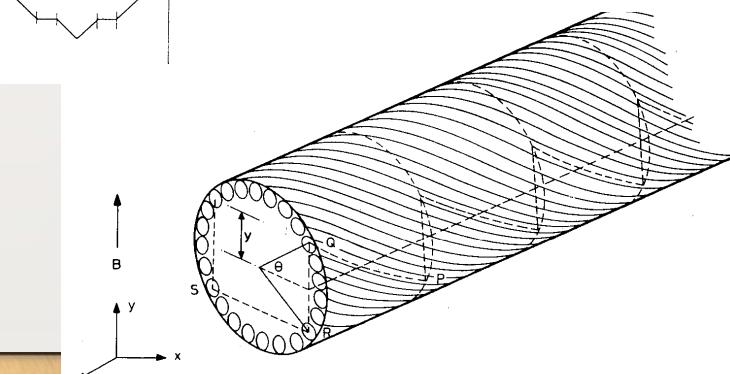


Fig. 8.15. Twisted filamentary composite in changing transverse field showing zig-zag path used to calculate flux linkages.

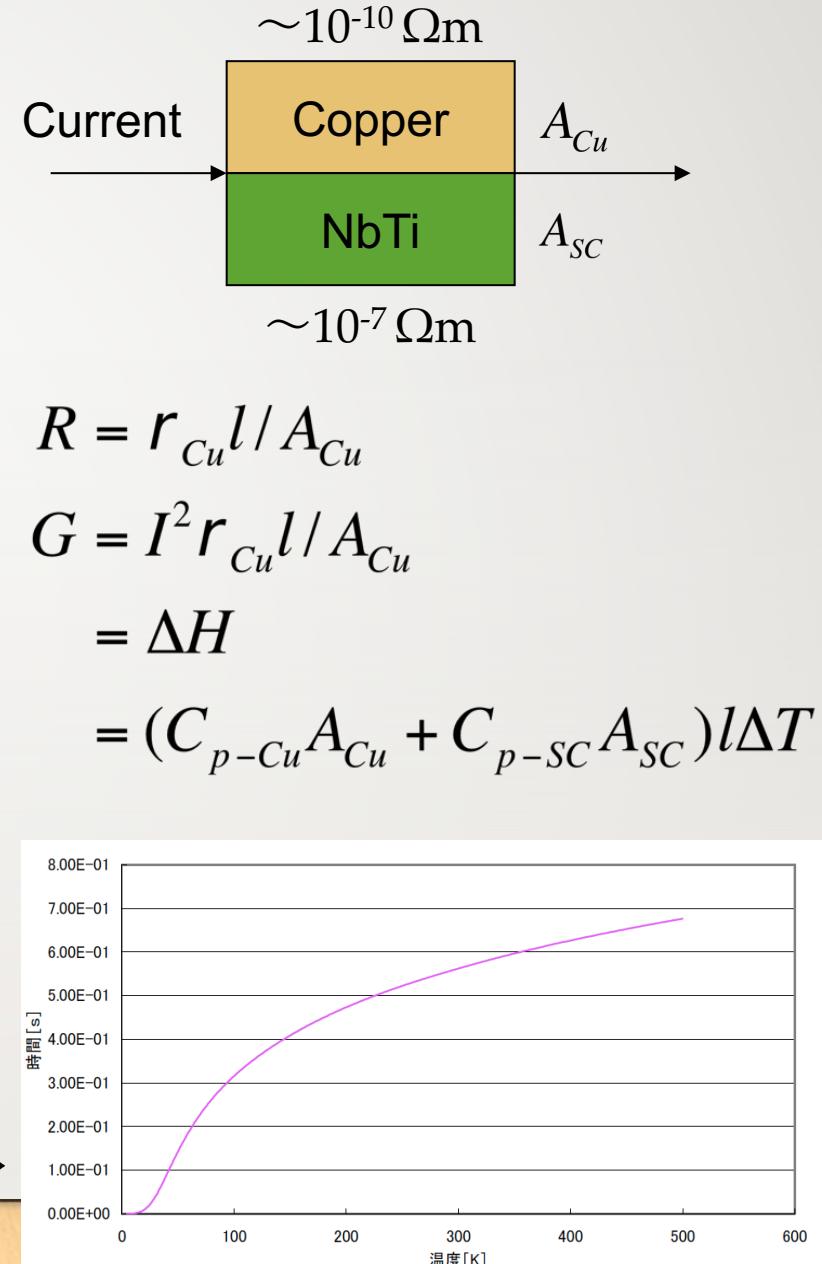
クエンチとクエンチ保護

- 臨界面を超えると常伝導転移
- 電流は安定化銅に移る→それでも急速な温度上昇
- 温度上昇の指標：MIITs

$$\int_{t_{quench}}^{t_{end}} I^2 dt = \int_{T_0}^{T_{\max}} \frac{C_{pCu} A_{Cu} + C_{pSC} A_{SC}}{r_{Cu}/A_{Cu}} dT$$

- MIITsを I^2 で割ると温度上昇にかかる時間

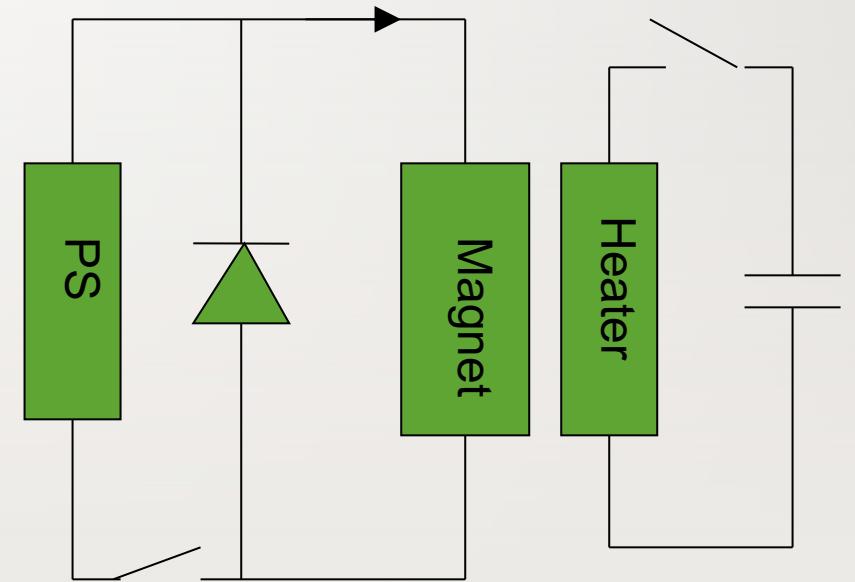
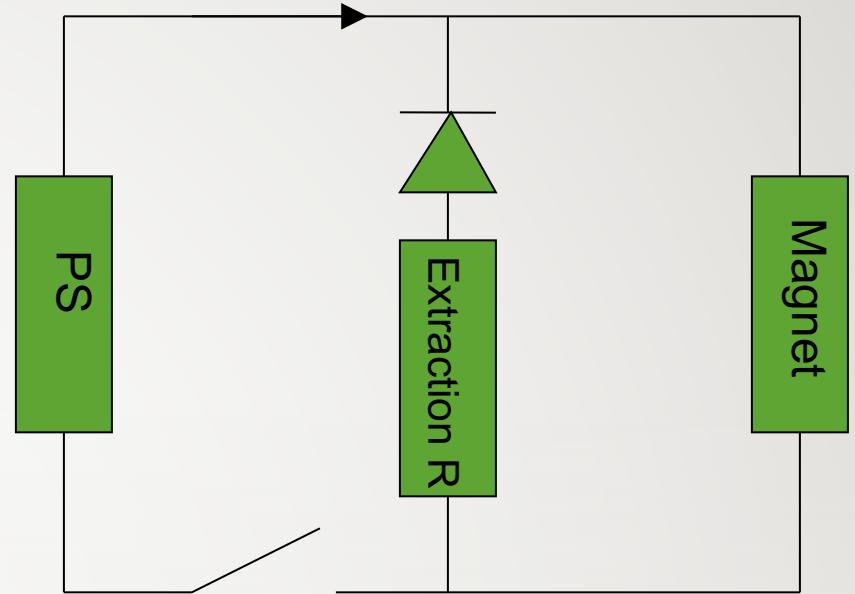
$Cu/NbTi=1, 400 \text{ A/mm}^2$ の場合 →



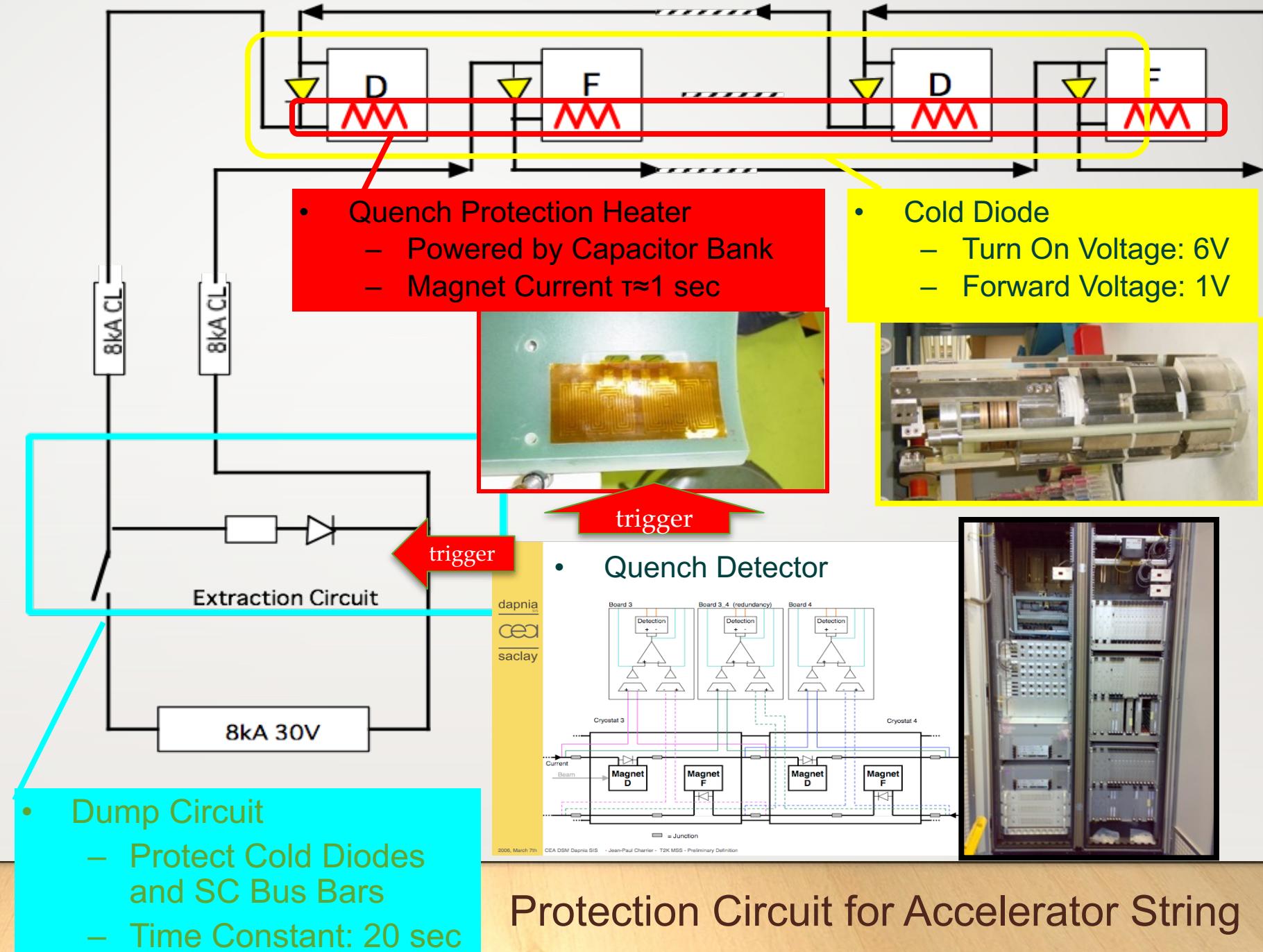
素早くクエンチを検出して電流を遮断しないとコイルが高温になる。

クエンチ保護

- 電流の素早い遮断が必要
 - 外部抵抗方式
 - 外にエネルギーを取り出すので復帰が早い
 - 磁石の両端に高電圧が立つ
 - クエンチ保護ヒーター方式
 - 磁石内部でエネルギーを分散させる
 - エネルギーは低温部に入ってしまう
 - この2つの方式の組み合わせで落とす



Quench Protection of Large Accelerator Magnet System: Neutrino Beam Line



LHCでの故障

- 原因

- 接続部のハンダ施工不良
- クエンチ検出に不備
- 巨大な蓄積エネルギー

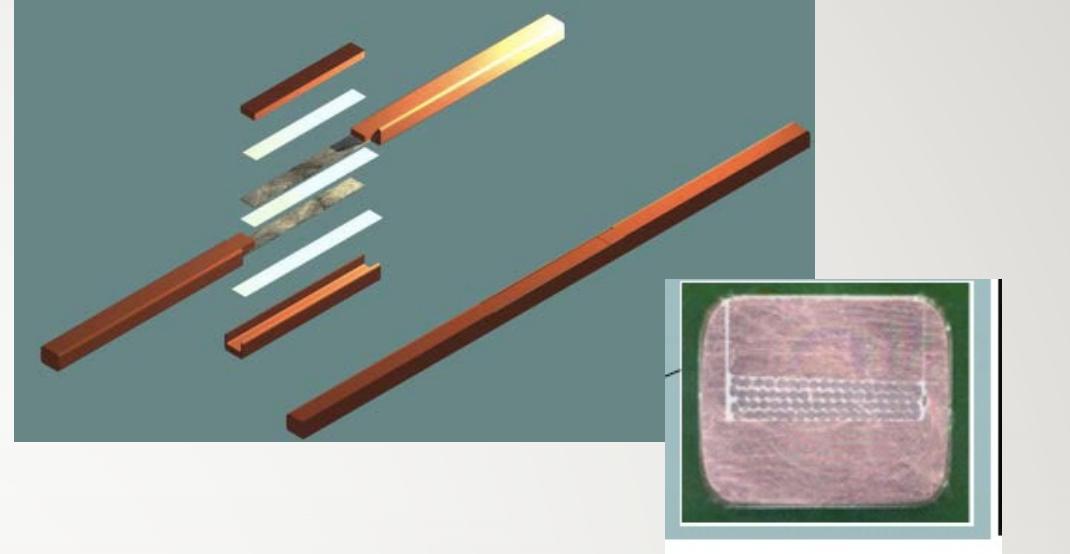
Defect B:
Soldered splice with
outside void and/or
lack of bonding



Defect C:
Badly soldered splice
($R > 0.3 \text{ n}\Omega$) with *inside*
void and/or lack of bonding



Defect D:
Splice with void and/or
lack of bonding and
small amount of SnAg
in vertical gap



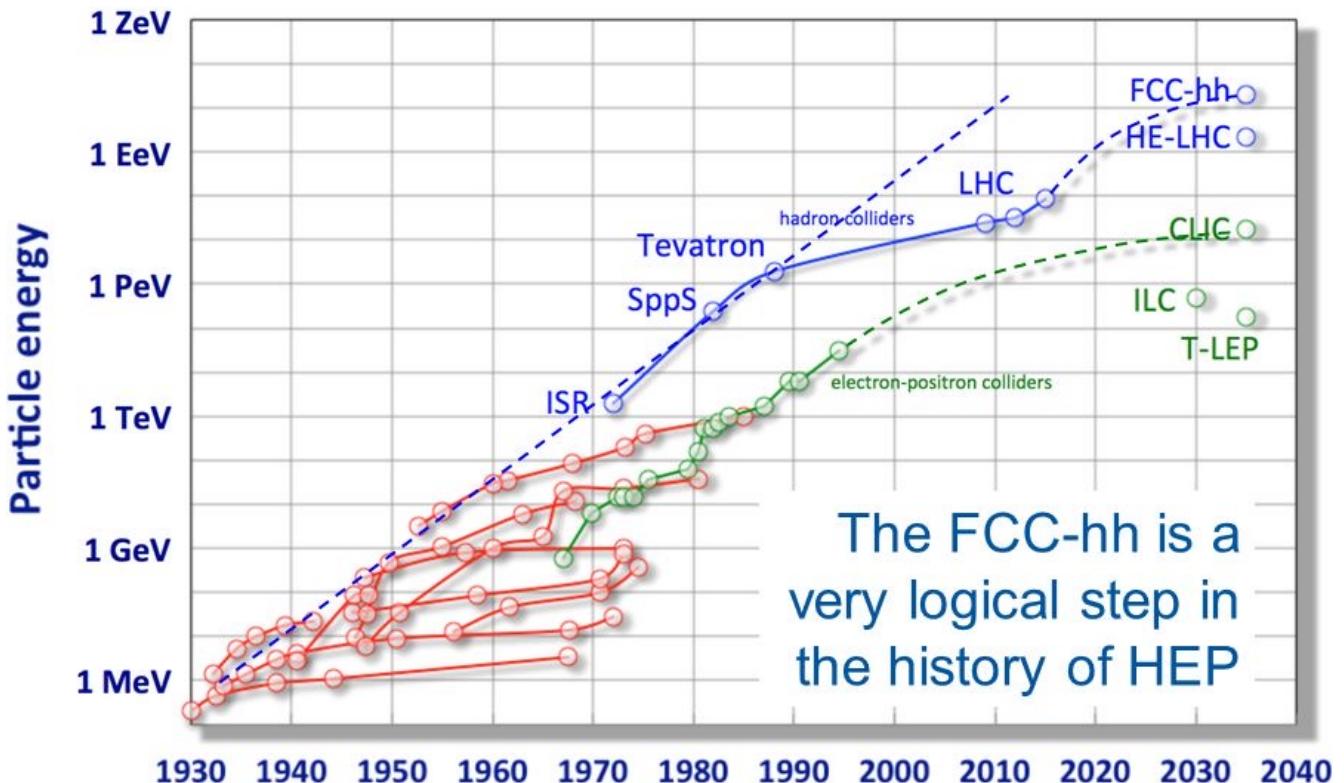
損害：300MJ近いエネルギーが放出：十数台のmagnetが損傷
修理：2年間かけて数千か所の接続を全て補修

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- **巨大加速器用超伝導磁石の歴史**
 - 加速器超伝導電磁石の実現
 - HERA, SSC, RHIC
 - LHC, HL-LHC
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

加速器の発展と超伝導応用

1895	クルックスのX線管
1911	超伝導発見 (Hg : K. Onnes)
1931	サイクロトロン (Lawrence)
1933	マイスナー効果 (W.Meissner)
1947	電子シンクロトロン
1952	陽子シンクロトロン
1957	BCS 理論 (J.Bardeen L.Cooper J.Schrieffer)
1965	MT1 (Magnet Technology Conf. SLAC)
1970	NbTi超伝導線の製造技術
1977	FNAL/Tevatron プロトタイプ磁石
1979	MRI 磁石の産業化
1983	FNAL/Tevatron: 6.3km (4.4T, 6.1m, 774)
1986	高温超伝導 (K.Muller, J. Bednorz)
1988	超伝導トカマク (TORE SUPRA)
1989	超伝導空洞 (KEK/TRISTAN)
1990~	MCZ 磁石の産業化
1992	DESY/HERA: 6.3km (4.7T, 8.8m, 416)
1998	BNL/RHIC: 3.8km (3.5T, 9.7m, 288)
2001	MgB ₂ (J. Akimitsu)
2008	CERN/LHC: 26.7km (8.3T, 14.2m, 1232)

The FCC in the Livingston plot



29

加速器って何？

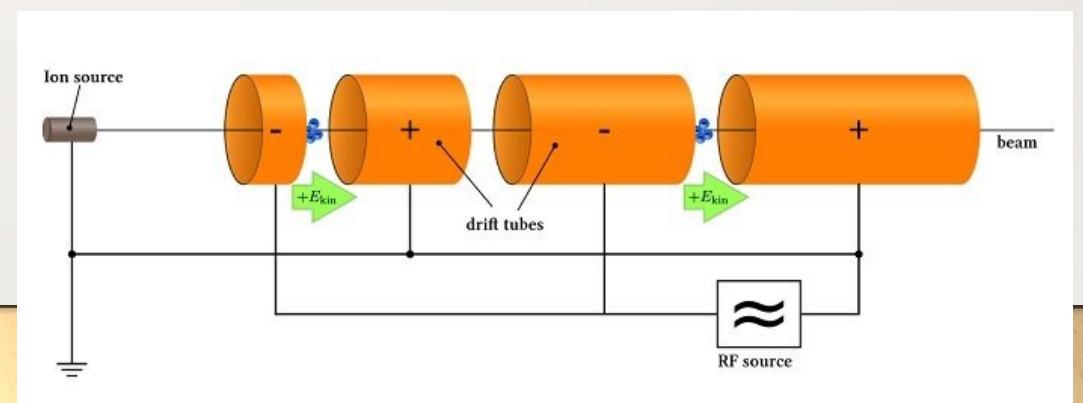
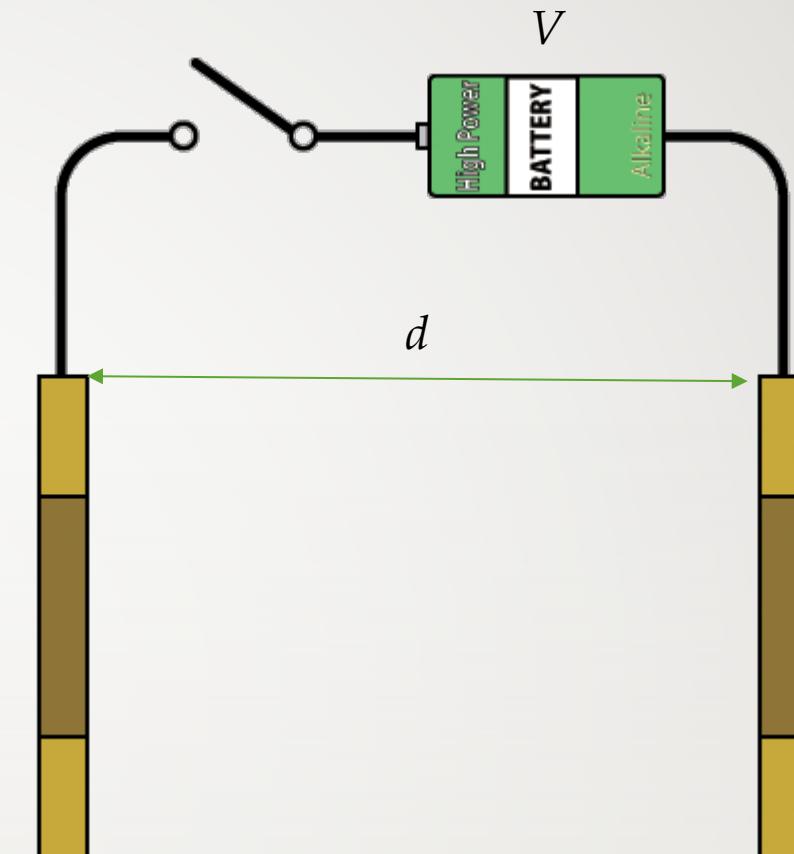
- 荷電粒子を加速する。

$$F = q \times E$$

F : 力

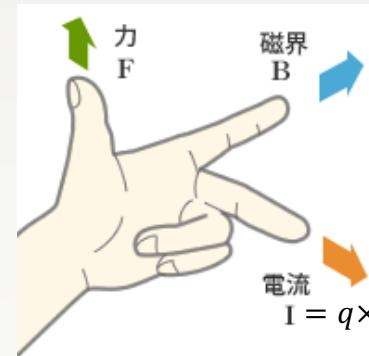
q : 電荷

E : 電場 ($E=V/d$)



30

円形加速器 シンクロトロン

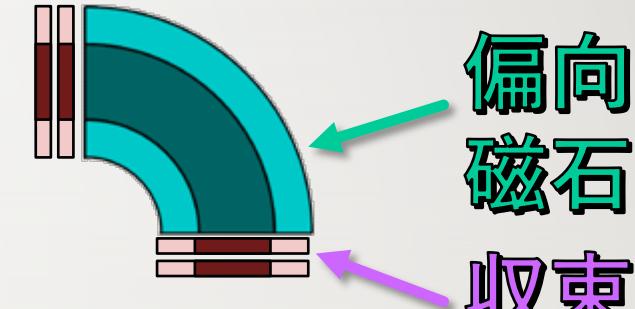
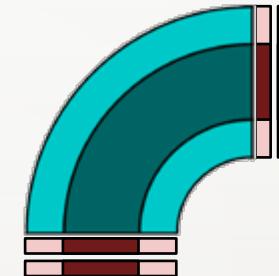


$$F = q \times v \times B = \frac{m \times v \times v}{r}$$

電磁力
遠心力

磁場で荷電粒子を曲げる

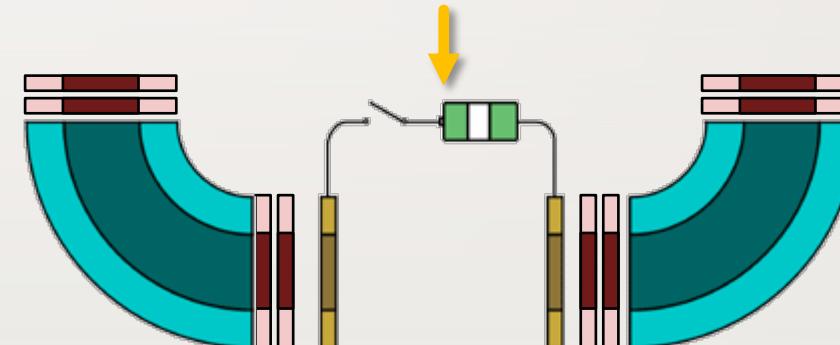
- 円形の軌道に荷電粒子を回しながら加速
- 加速装置を使い回す
- 磁場は粒子の速度に合わせて強くする



$$r = \frac{m}{q} \times \frac{v}{B} = \frac{p}{qB}$$

高運動量（高エネルギー）の粒子を
限られた半径で曲げるには高磁場が必要

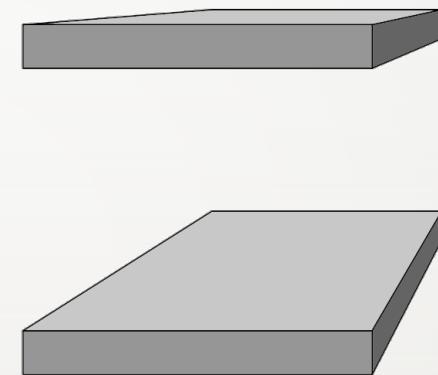
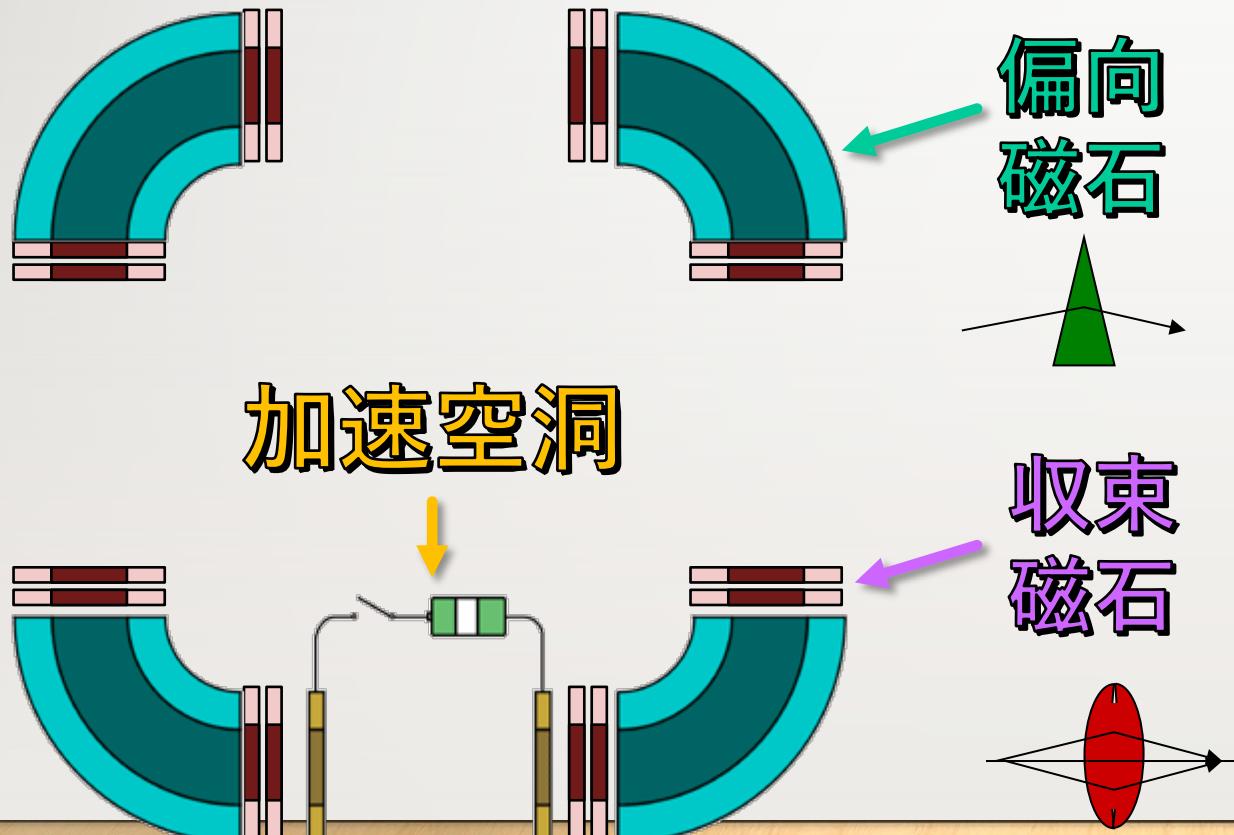
加速空洞



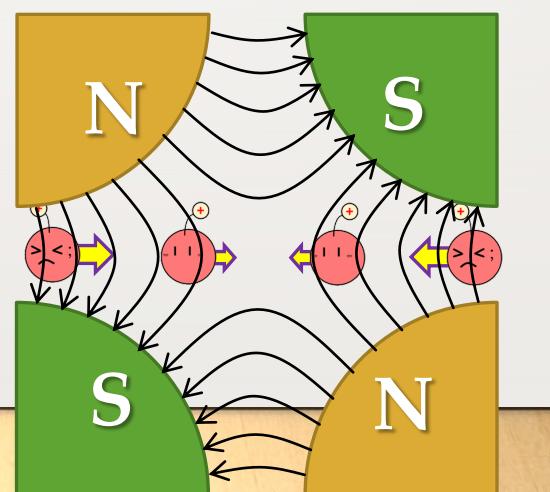
$$Br = \frac{p}{q} : \text{rigidity}$$

電場で荷電粒子を加速する

シンクロトロンに 必要な磁石



- 偏向磁石
 - ノーマル2極磁石
 - ビームを曲げる
 - 均一磁場



- 収束(発散)磁石
 - ノーマル4極磁石
 - ビームを収束させる
 - 勾配磁場

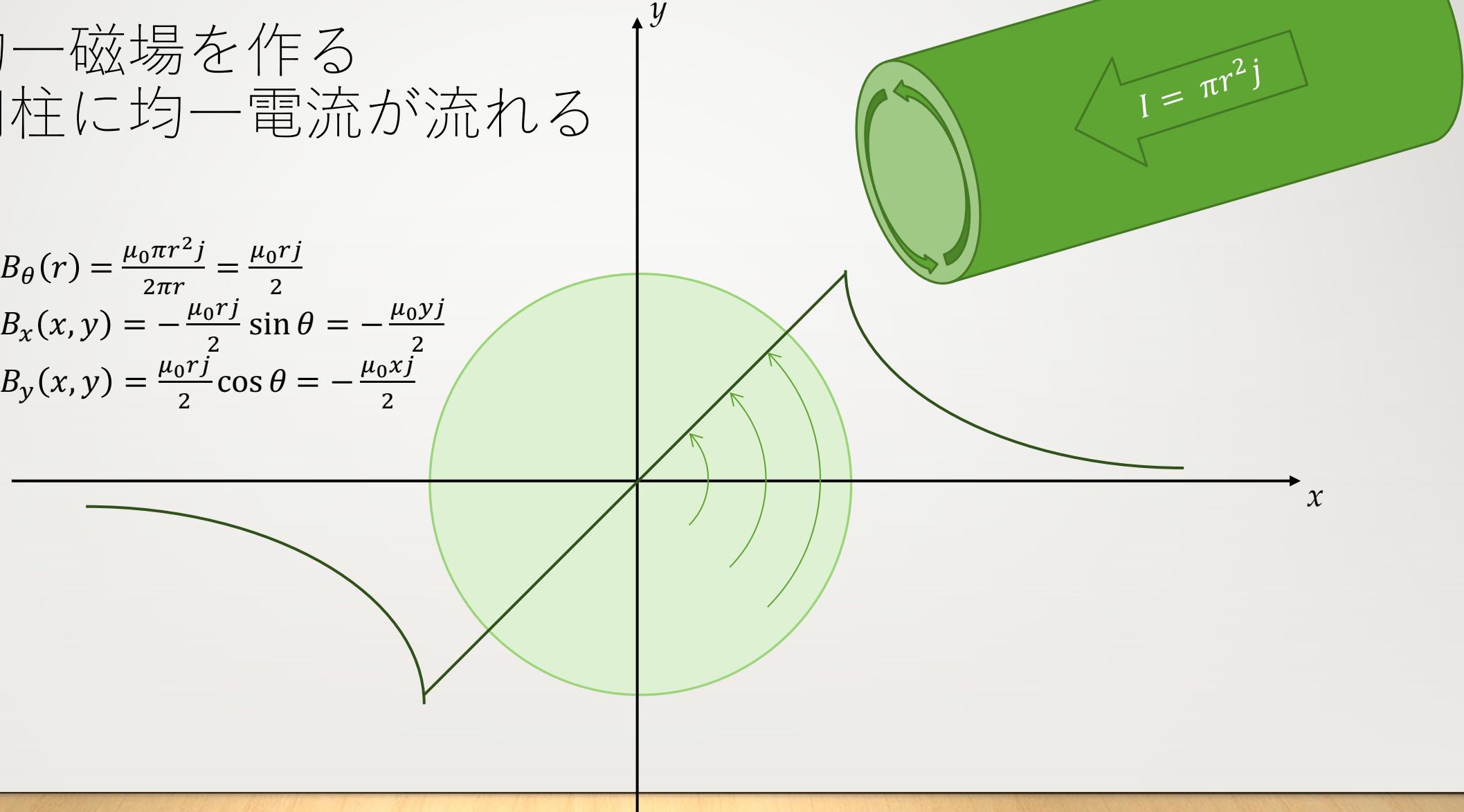
32

均一磁場を作る
円柱に均一電流が流れる

$$B_\theta(r) = \frac{\mu_0 \pi r^2 j}{2\pi r} = \frac{\mu_0 r j}{2}$$

$$B_x(x, y) = -\frac{\mu_0 r j}{2} \sin \theta = -\frac{\mu_0 y j}{2}$$

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 r j}{2} \cos \theta = -\frac{\mu_0 x j}{2}$$



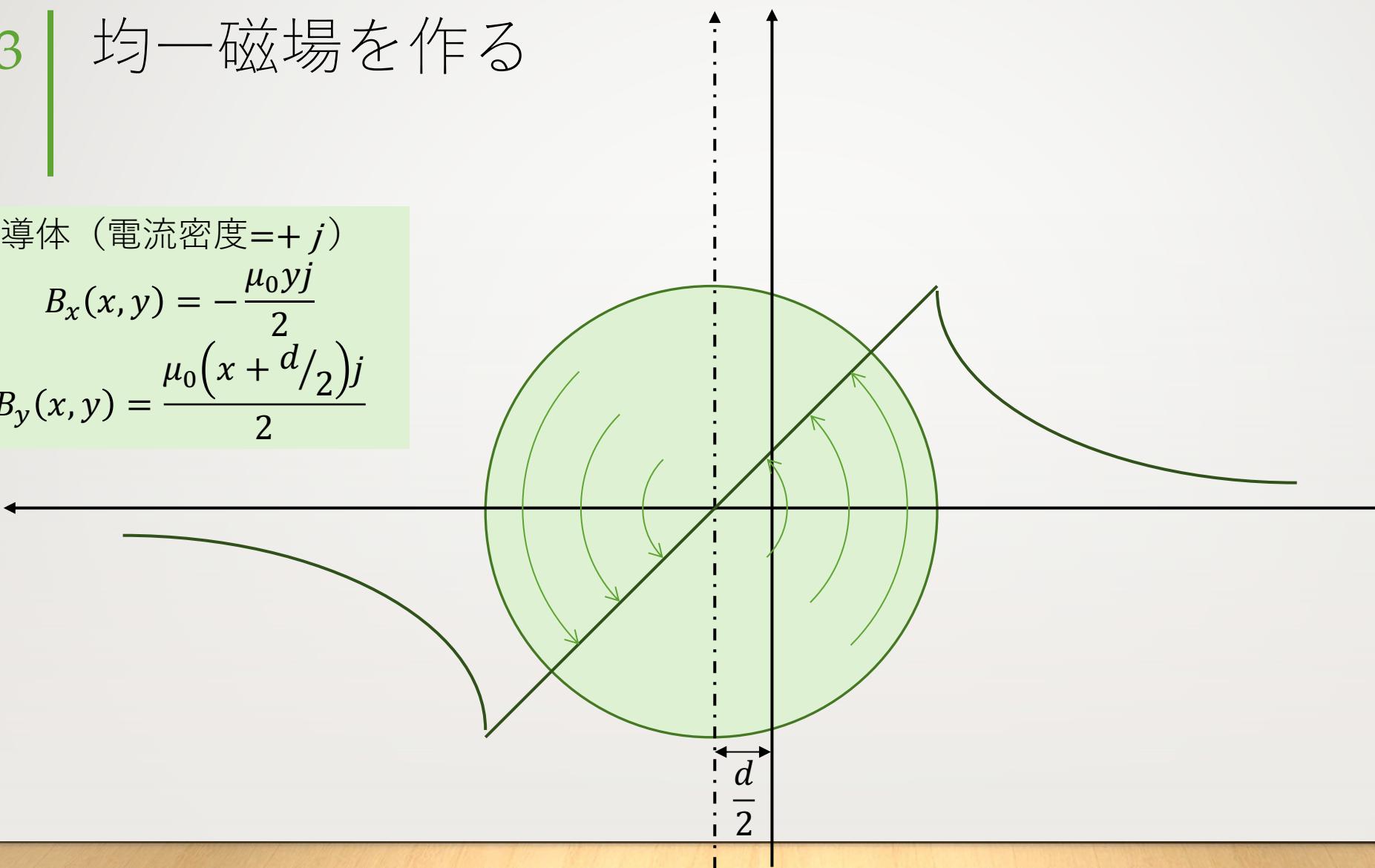
33

均一磁場を作る

左導体 (電流密度=+ j)

$$B_x(x, y) = -\frac{\mu_0 y j}{2}$$

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 (x + d/2) j}{2}$$



左導体 (電流密度= $+j$)

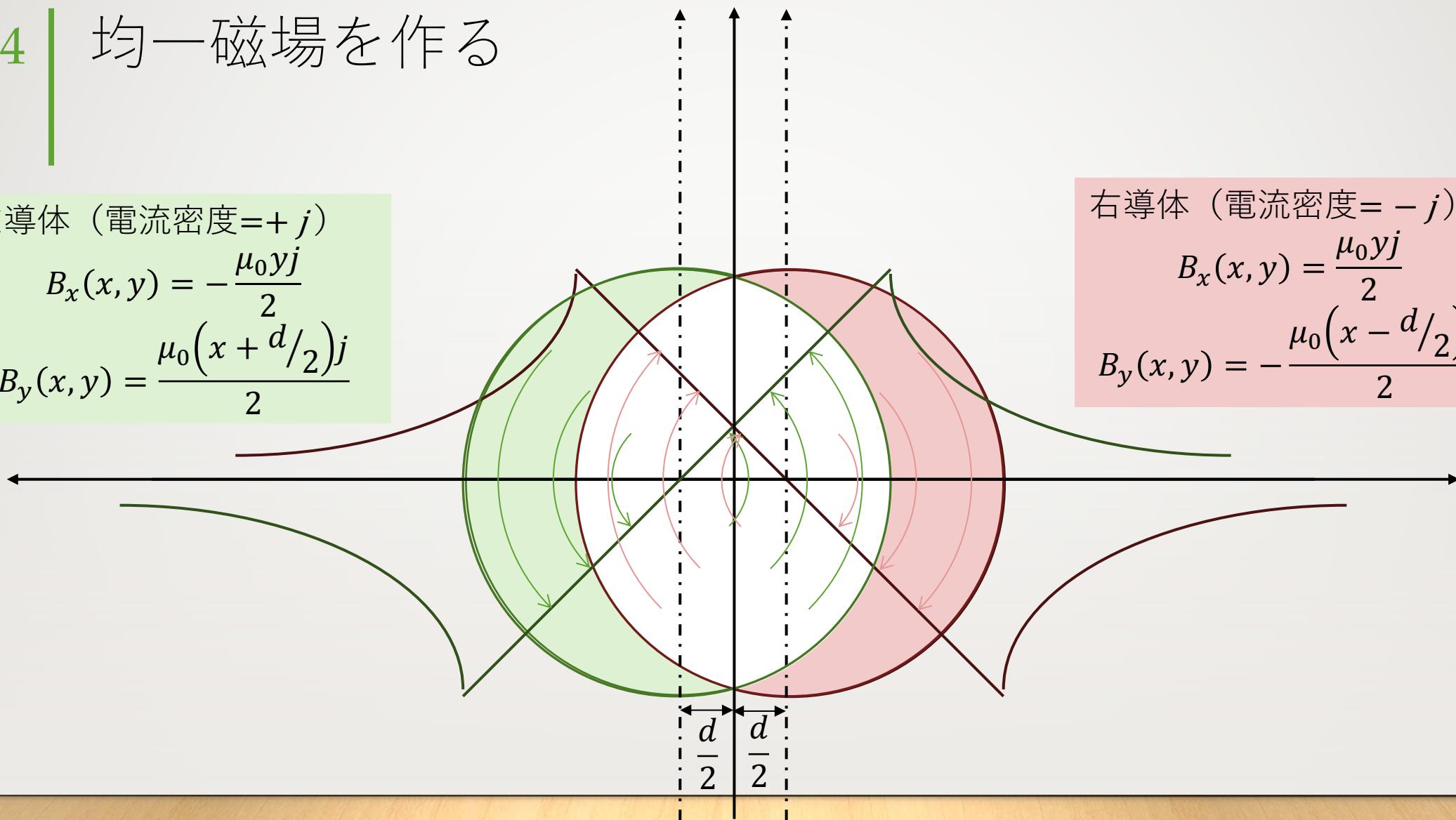
$$B_x(x, y) = -\frac{\mu_0 y j}{2}$$

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 (x + d/2) j}{2}$$

右導体 (電流密度= $-j$)

$$B_x(x, y) = \frac{\mu_0 y j}{2}$$

$$B_y(x, y) = -\frac{\mu_0 (x - d/2) j}{2}$$



35

均一磁場を作る

左導体 (電流密度=+ j)

$$B_x(x, y) = -\frac{\mu_0 y j}{2}$$

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 (x + d/2) j}{2}$$

導体が重なり合ったところ (電流密度=0)

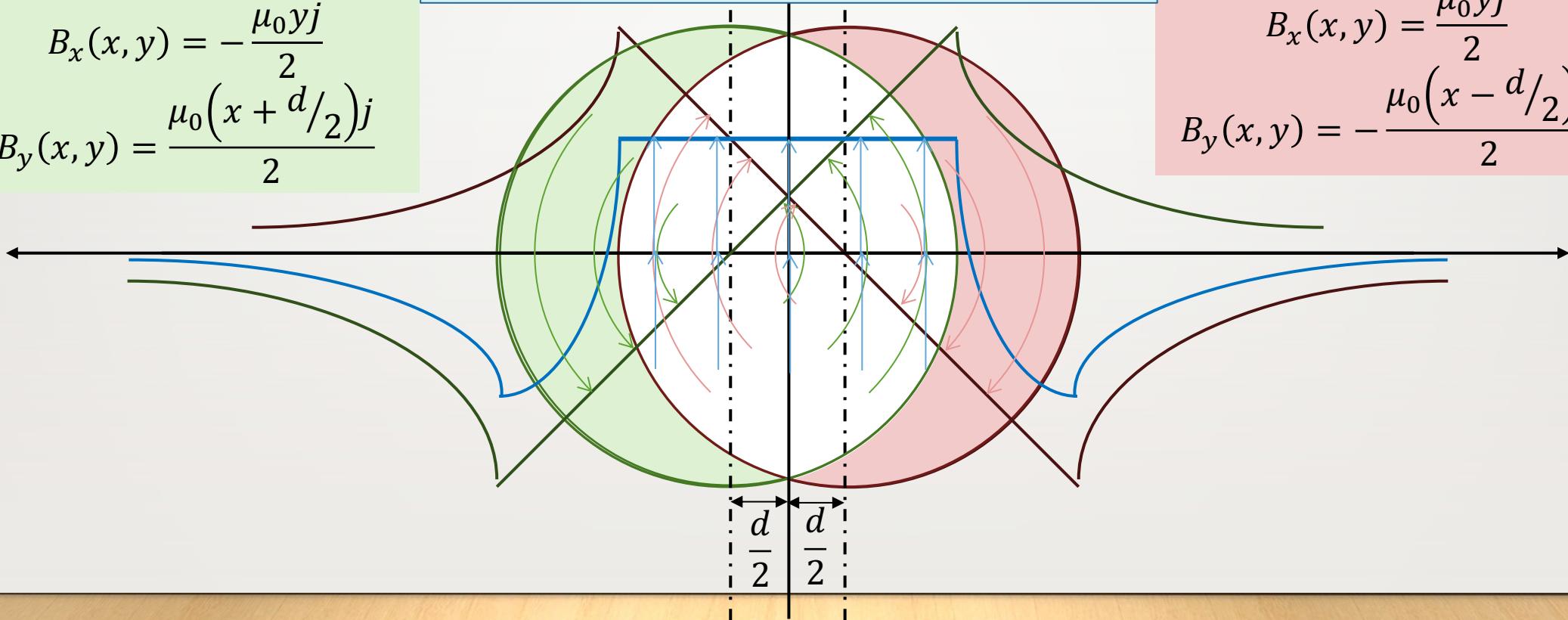
$$B_x(x, y) = 0$$

$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 j d}{2}$$

右導体 (電流密度=- j)

$$B_x(x, y) = \frac{\mu_0 y (-j)}{2}$$

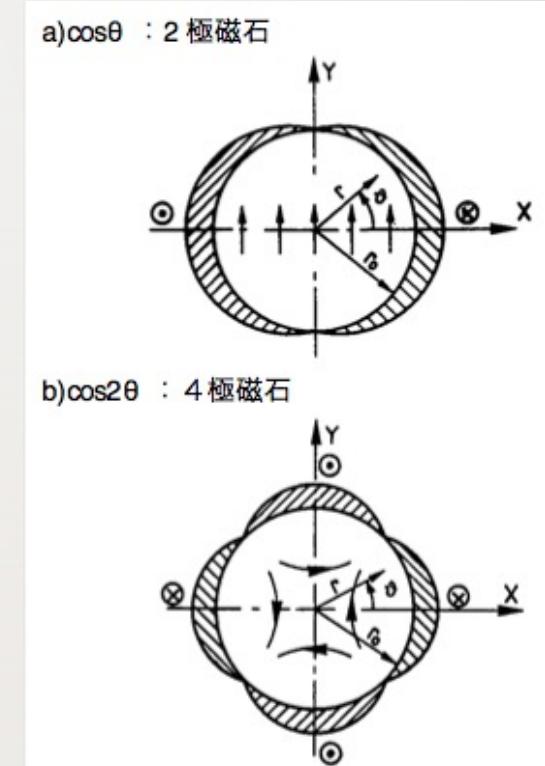
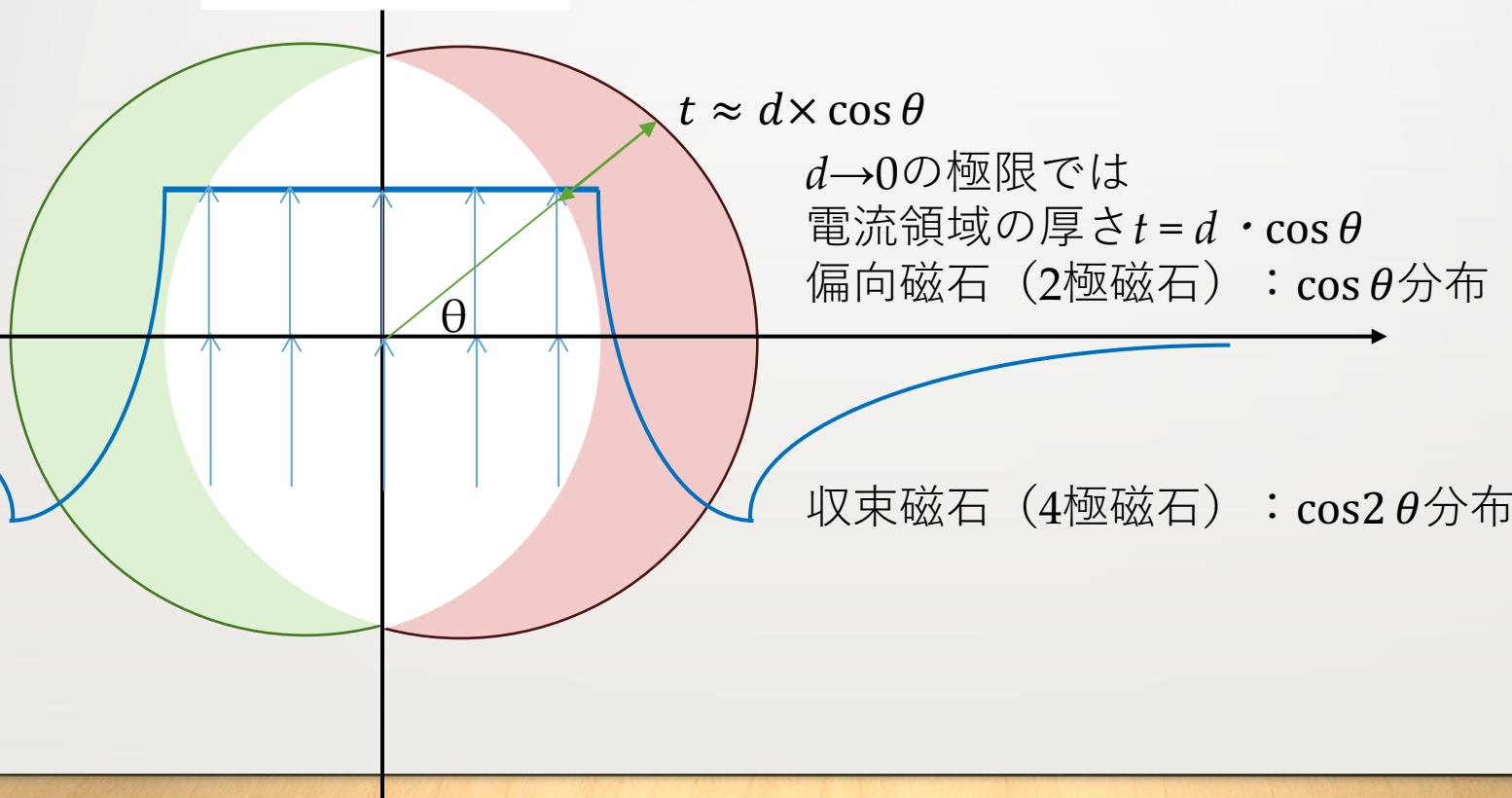
$$B_y(x, y) = -\frac{\mu_0 (x - d/2) (-j)}{2}$$



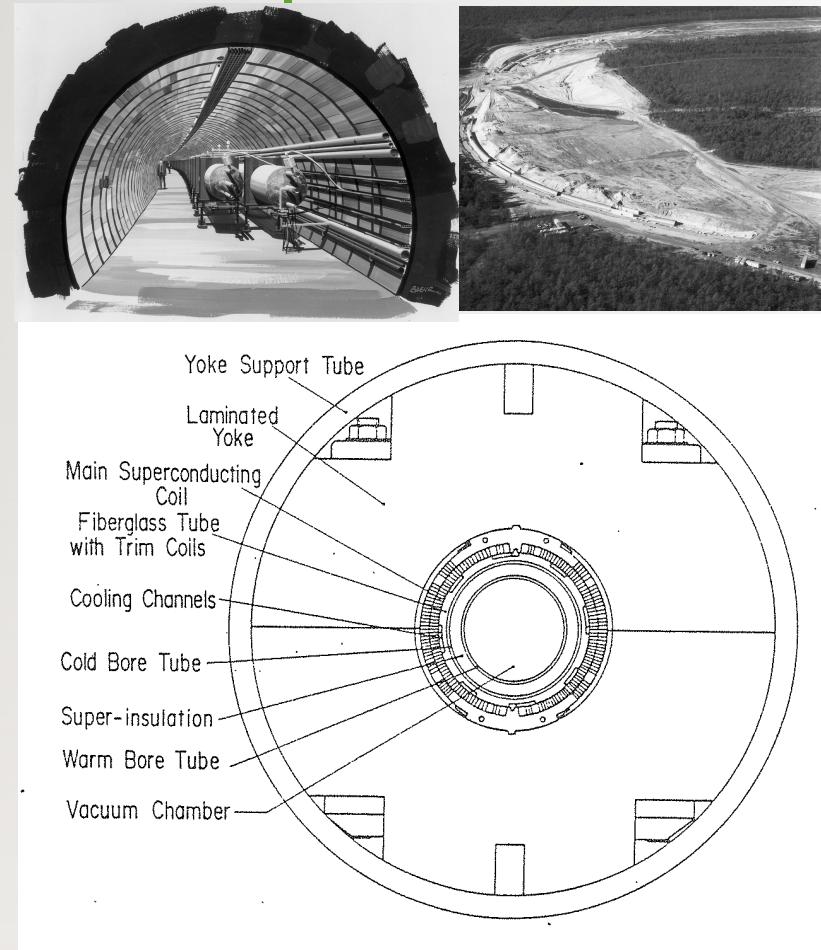
$\cos\theta$ 分布

$$B_x(x, y) = 0$$

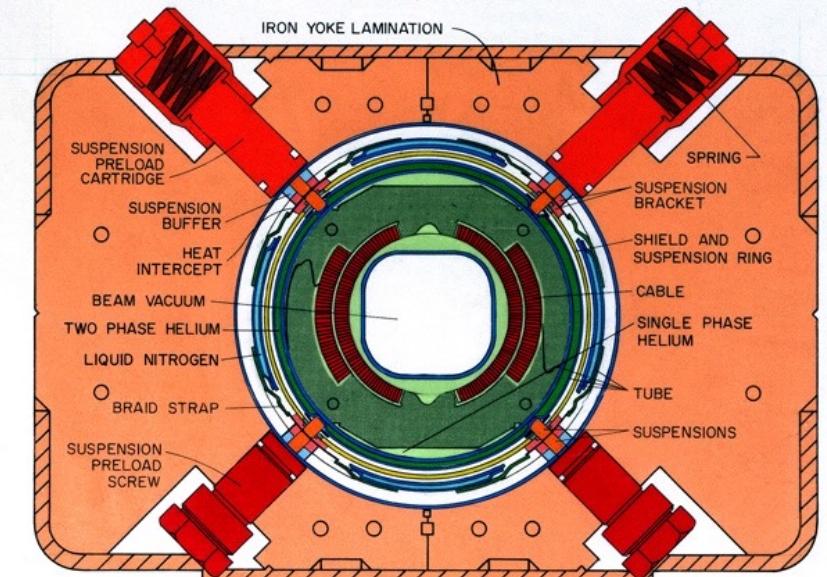
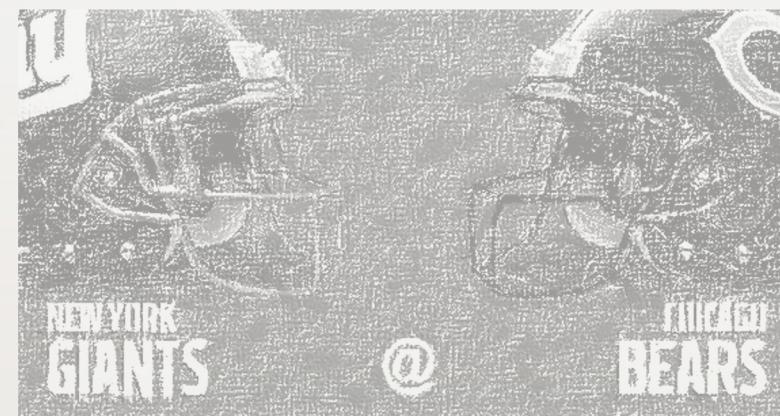
$$B_y(x, y) = \frac{\mu_0 j d}{2}$$



加速器における超伝導磁石応用の歴史：BNL vs FNAL



1970年代から1980年代初頭に
2つの米国研究所が熾烈な競争



ISABELLE/CBA (BNL) 3.8km, 400GeV
(Magnet: 5.28T)

TEVATRON(FNAL): 6.3km, 1TeV
(Magnet: 4.4T, 6.1m, 774台)

TEVATRON

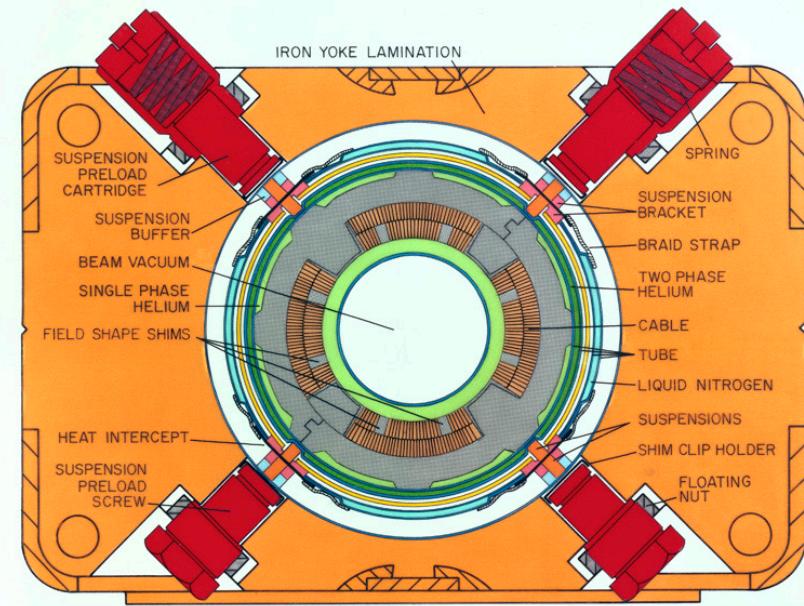
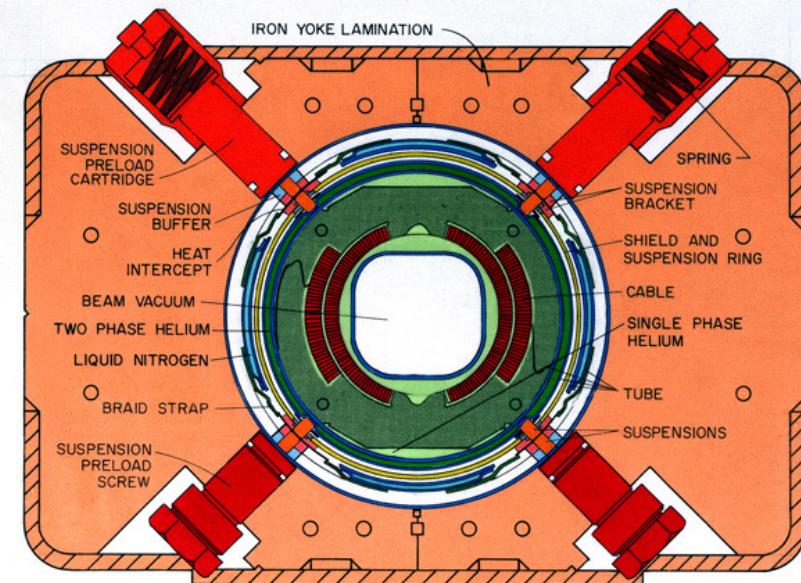
- Energy Doubler (1 TeV)
 - Higher Field Magnet 4.3 T
- Energy Saver
 - $\sim 1/2$ Overall Power Saving



Tunnel is given (main ring)



SCMs are installed in the same tunnel

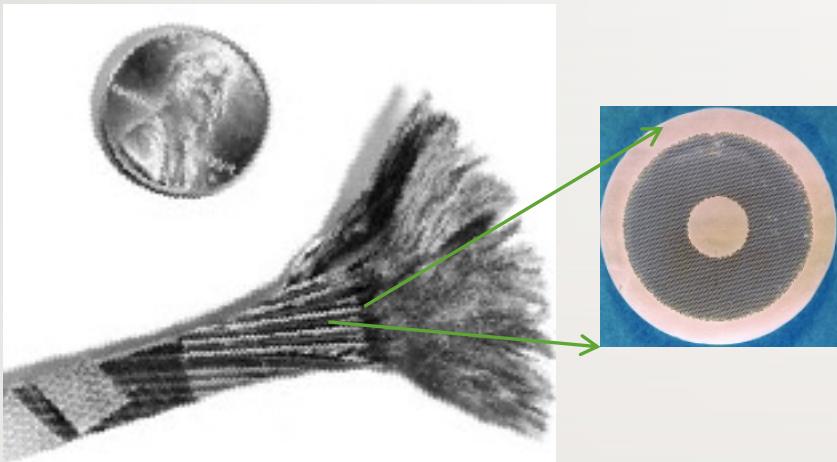


Warm Iron Magnet

Mis-alignment of iron to coil
= unwanted field harmonics

TEVATRON Coil Structure

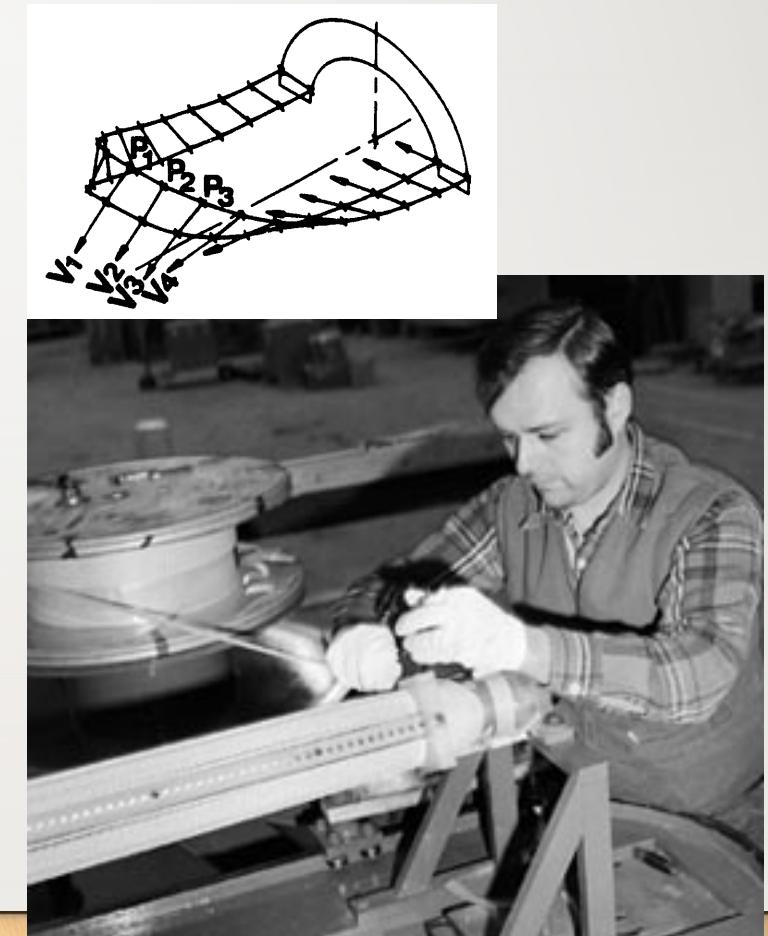
- Rutherford Cable



- $\cos\theta$ Coil



- Saddle Shape End

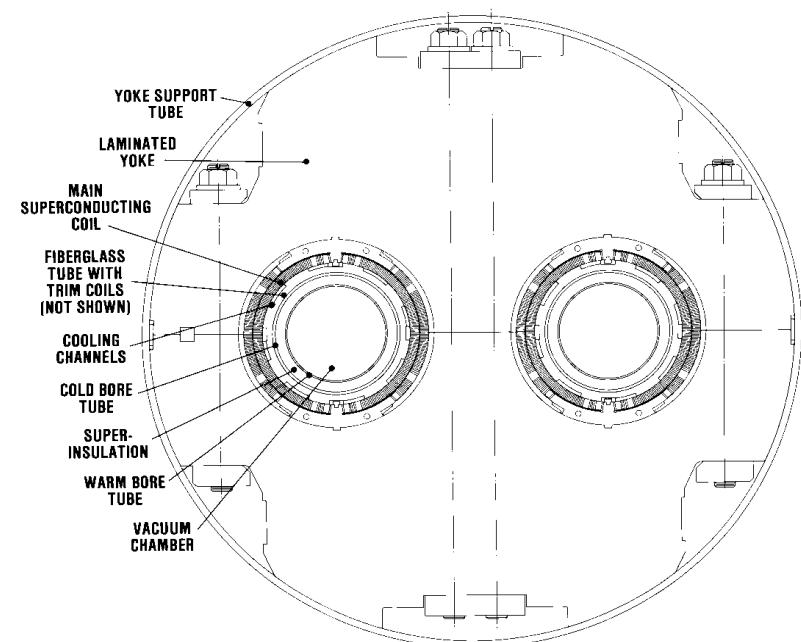
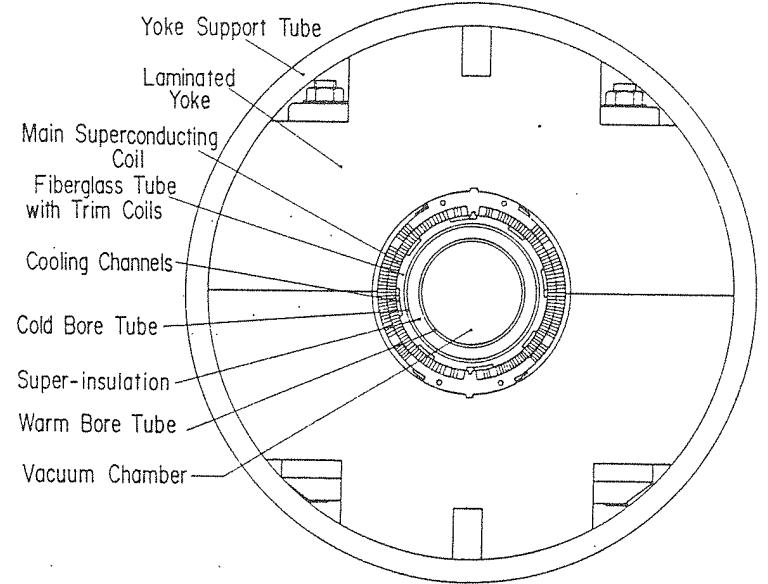


ISABELLE/CBA

- PP Collider (400 GeV)
 - Higher Field Magnet 5.28 T
- Cold Iron Structure
 - Additional Support
 - Two in One was also proposed



ISABELLE Bladed Cable



- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- **巨大加速器用超伝導磁石の歴史**
 - 加速器超伝導電磁石の実現
 - **HERA, SSC, RHIC**
 - LHC, HL-LHC
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

HERA



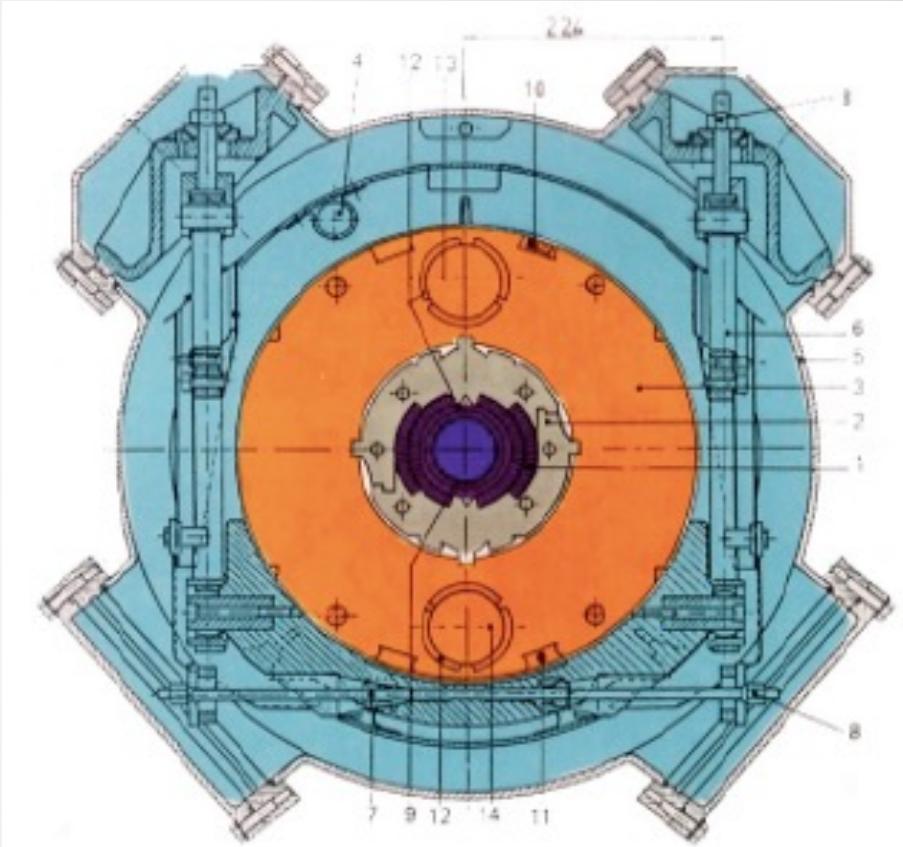
HERA Tunnel

Aerial View of DESY

Superconducting p-Ring



Normal e-Ring

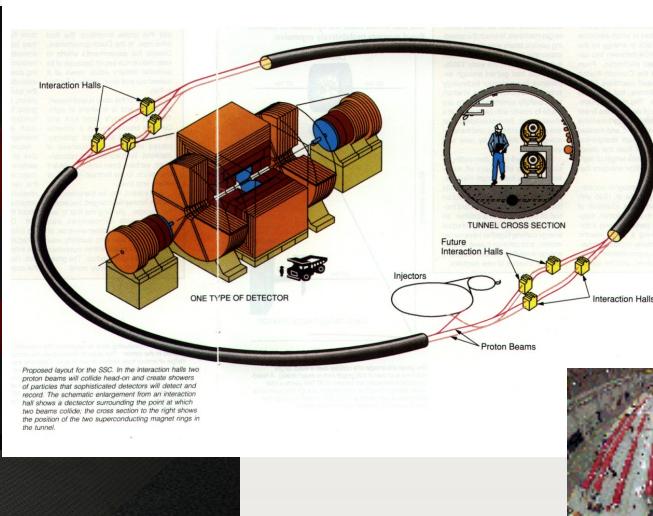
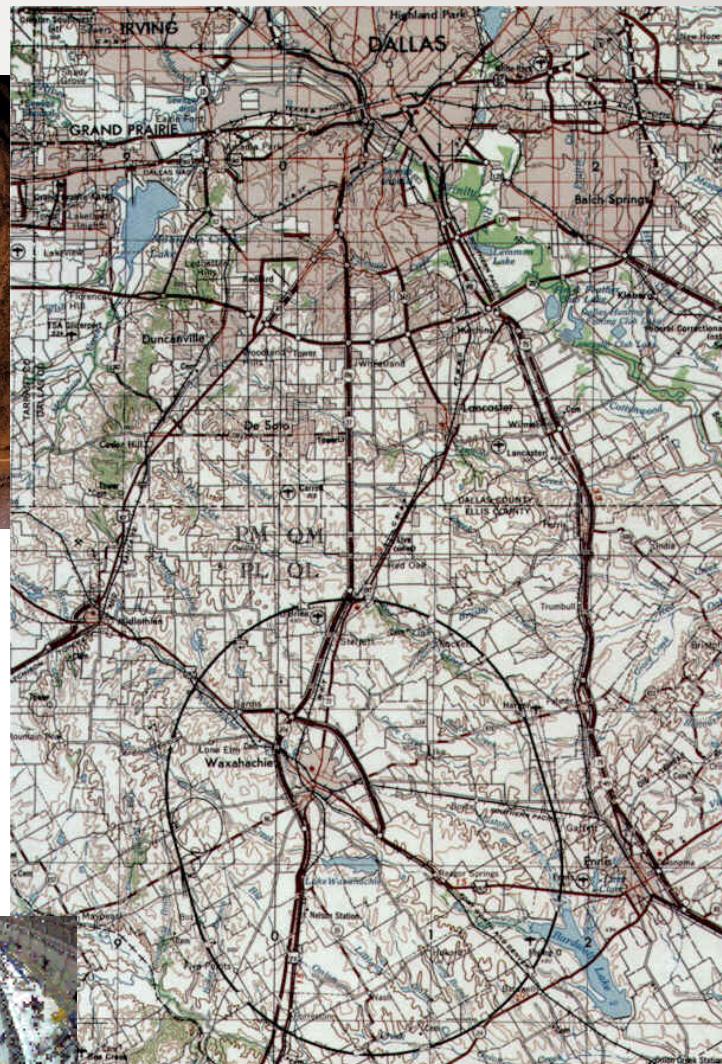


HERA Dipole
Cold Iron to eliminate iron-coil mis-alignment
But no additional mechanical support

"The p-ring was easier
to maintain, because
no water in tunnel"
Holger Lierl@DESY

加速器における超伝導磁石応用の歴史 SSCの悲劇

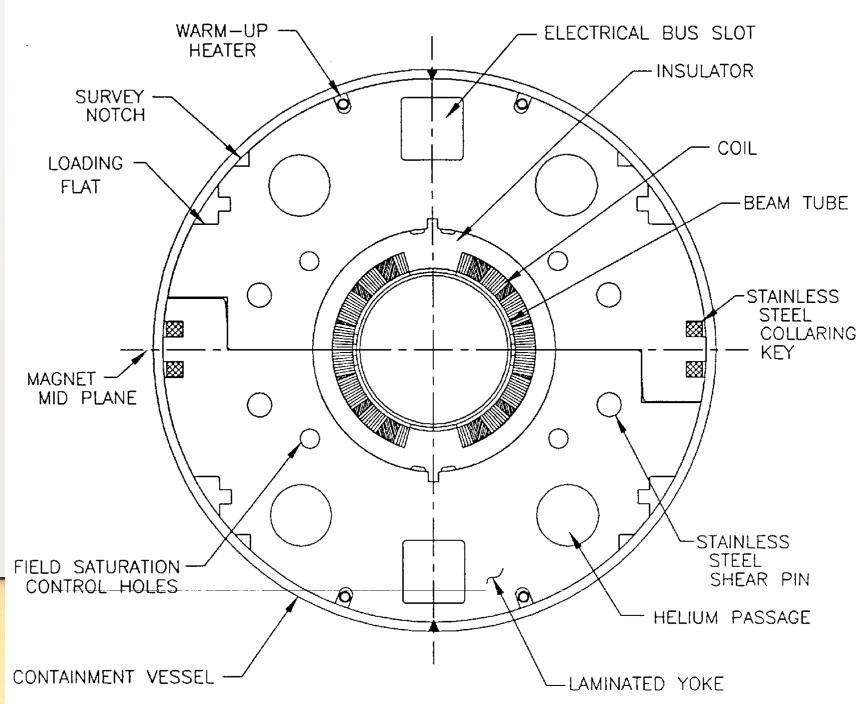
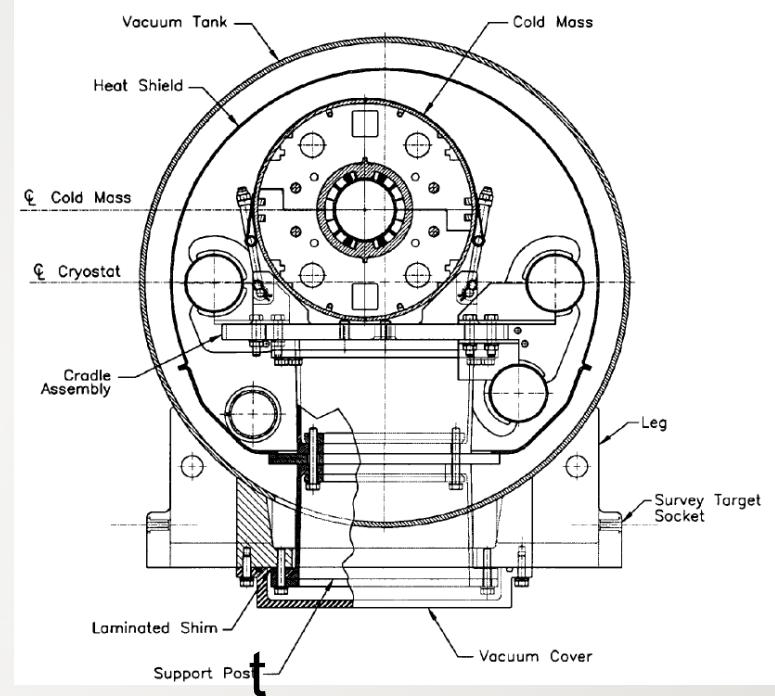
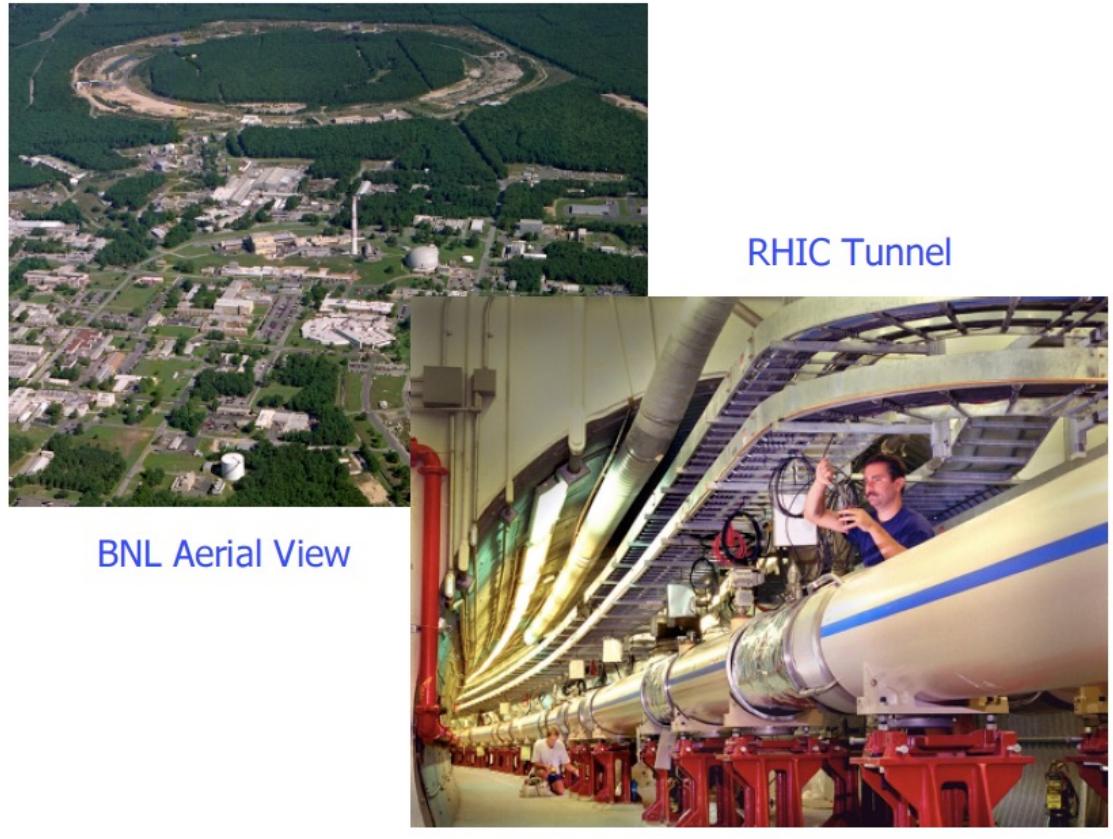
- 1988年建設開始 > 1993年中止
- コスト制御に失敗 : 4.4B\$ → 12B\$
- 2B\$は既に投資



“Contrary to all the hype, the **SSC will not cure cancer**, will no provide a solution to the problem of male-pattern baldness, and will not guarantee a World Series victory for the Chicago Cubs”. Congress Man Sherwood Boehlert

RHIC

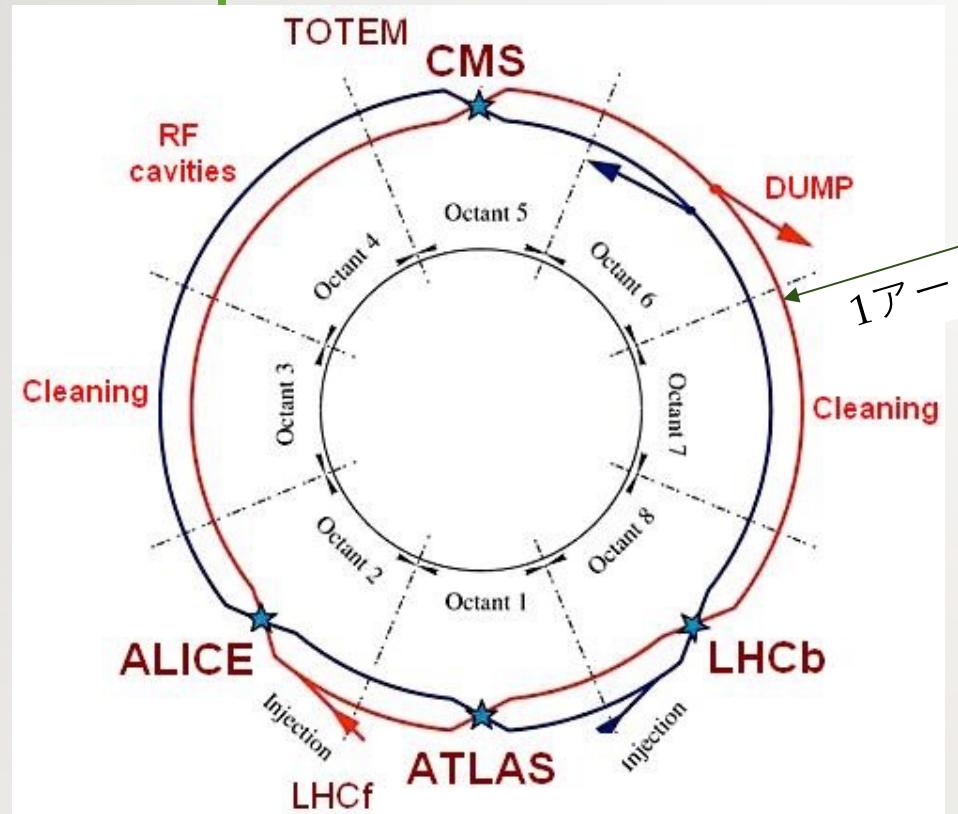
- Given tunnel 3.8 km
- Medium field 3.5 T



Yoke Collar
Structure
Plastic Collar
Low Cost

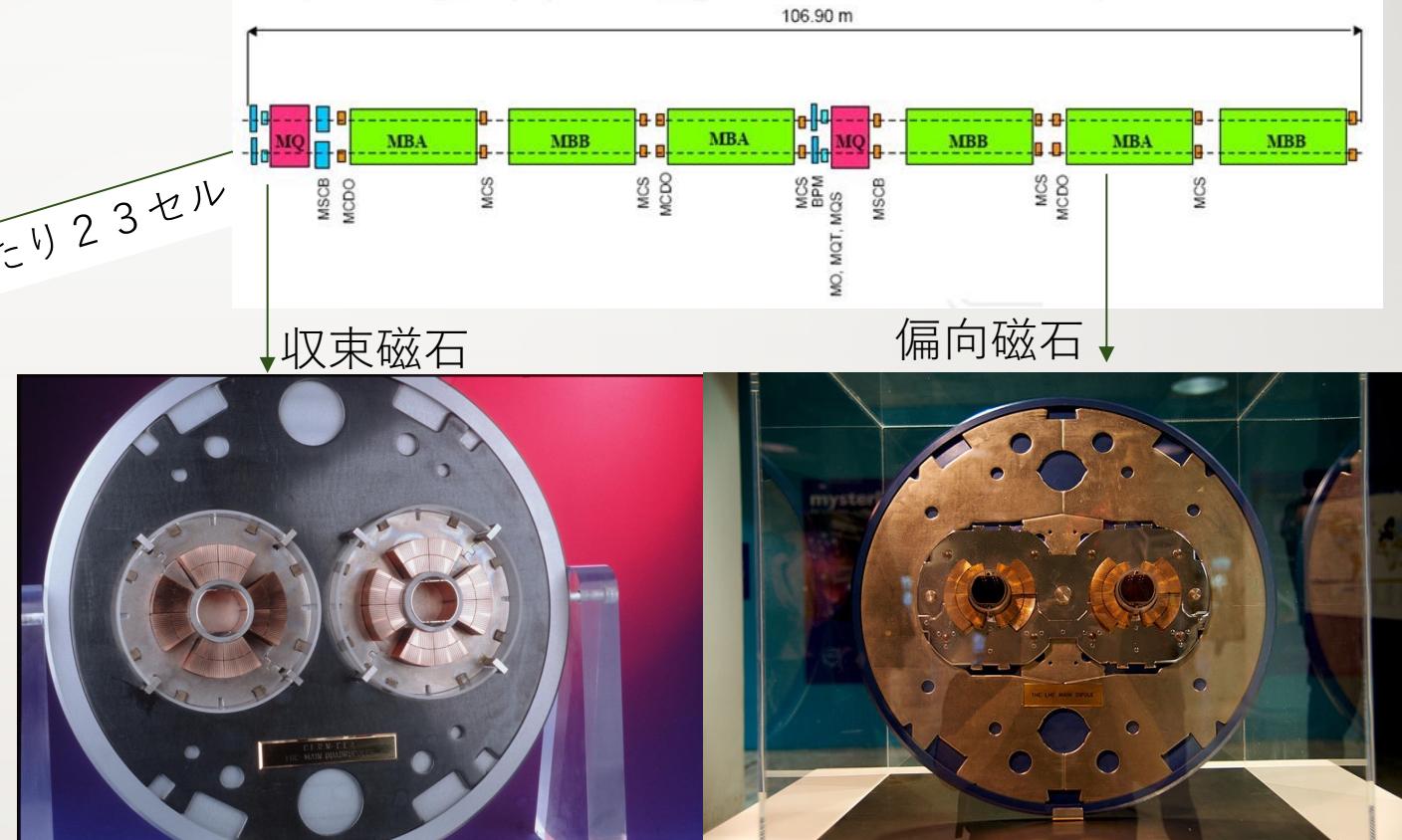
- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- **巨大加速器用超伝導磁石の歴史**
 - 加速器超伝導電磁石の実現
 - HERA, SSC, RHIC
 - **LHC, HL-LHC**
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

LHC: Large Hadron Collider



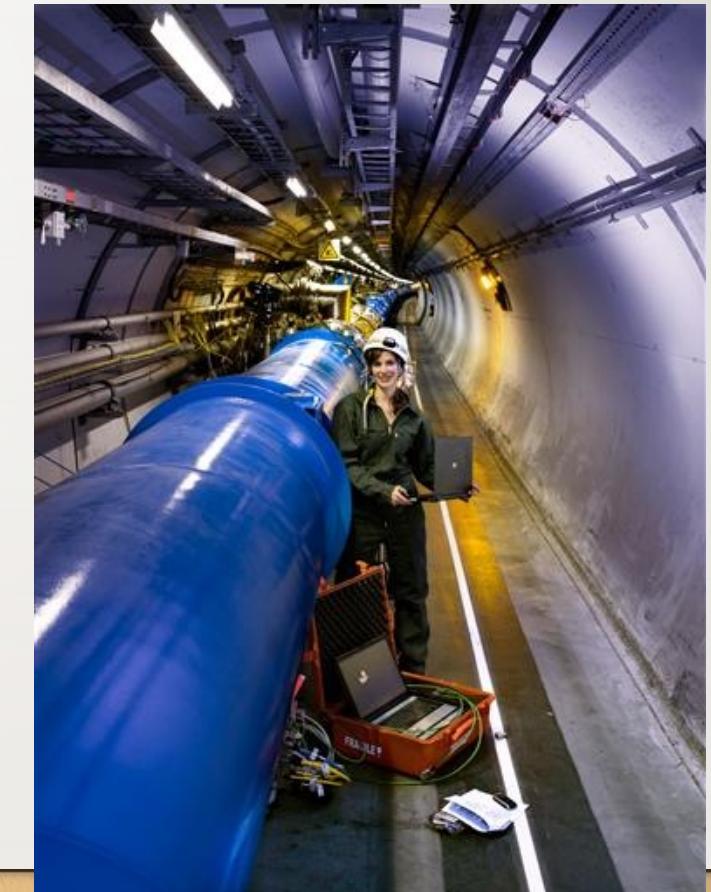
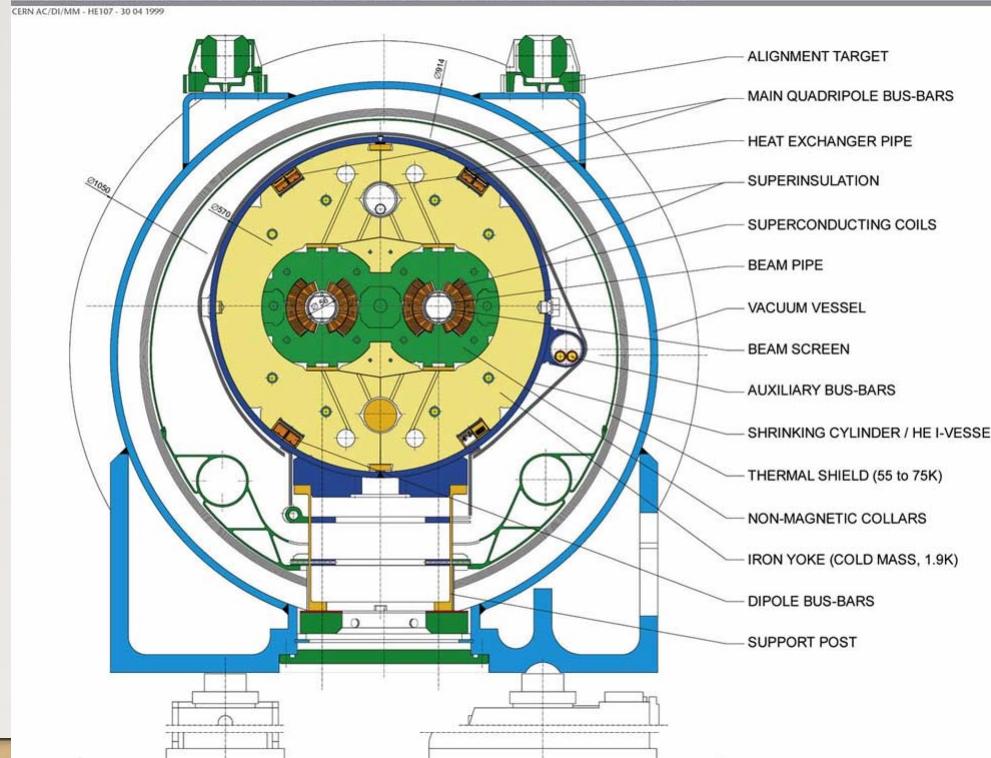
8 個の 2.45 km アークと 8 個の 545 m 直線部

1 セル：偏向磁石 6 個 + 収束磁石 1 個 + 発散磁石 1 個



加速器における超伝導磁石応用の歴史 LHC

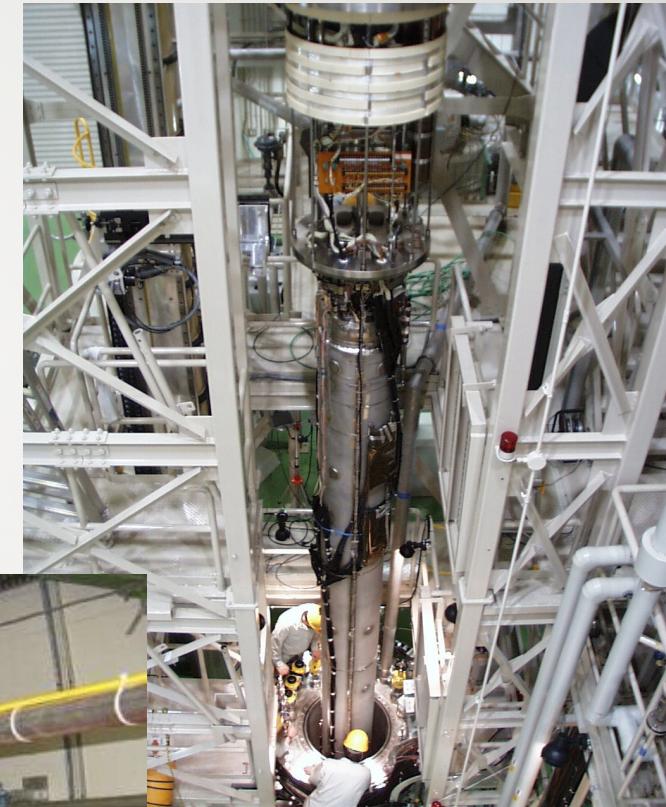
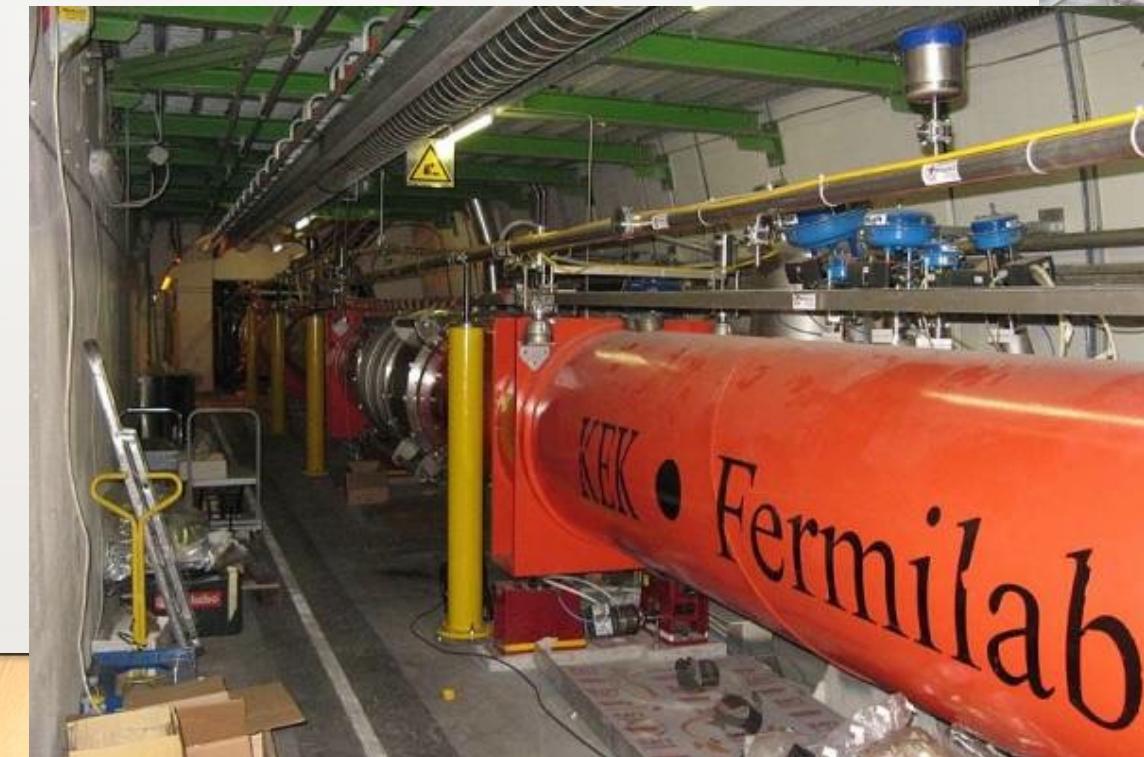
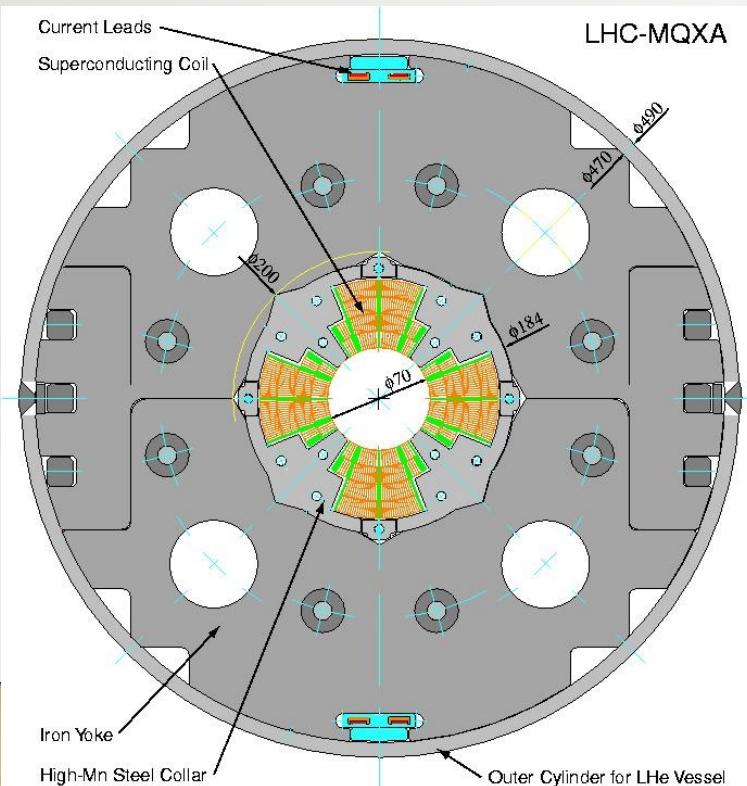
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



2008年 : CERN/LHC: 26.7km (8.3T, 14.2m, 1232台)

LHCへの日本の貢献 MQXA:衝突点 4 極磁石

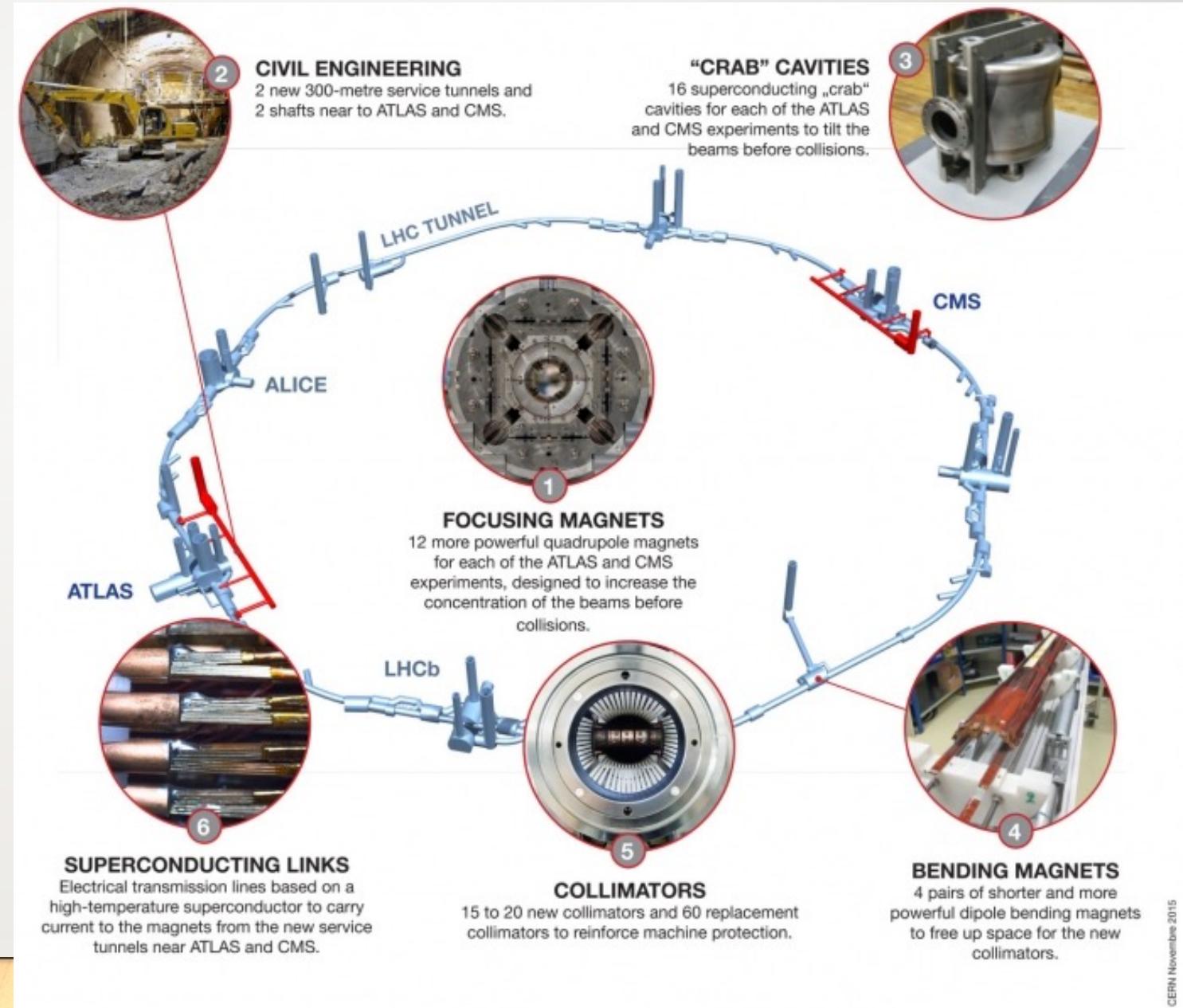
- 衝突点近くでビームを集め (衝突確率を上げる)
 - 磁場勾配280T/m, 最大磁場 8.7 T



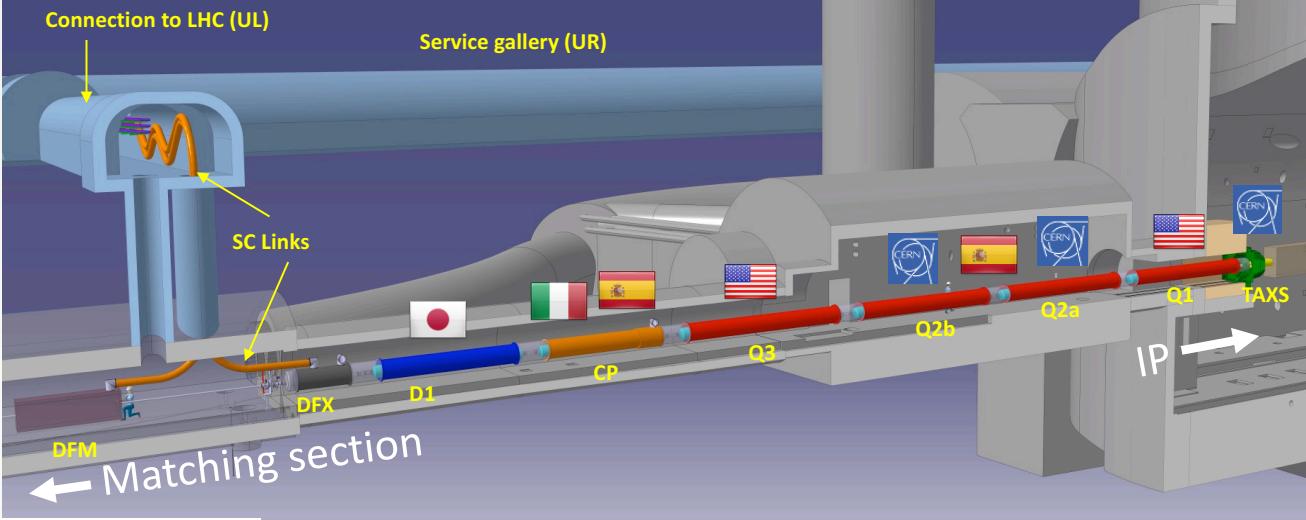
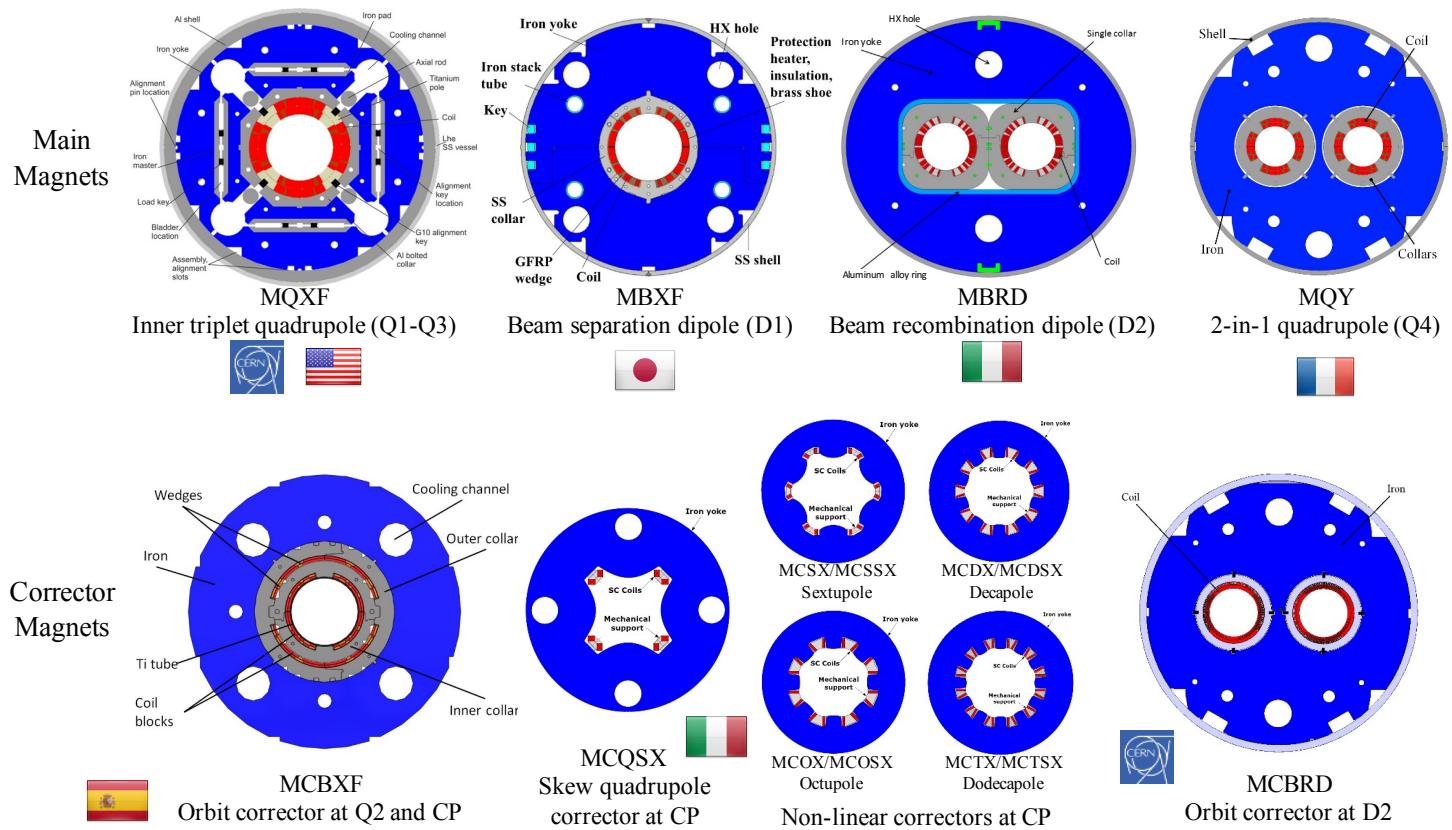
将来に向けて HL-LHC



- LHCを高輝度化して実験を効率化
- 統計が貯まるのが早くなる
- 今まで見えなかつたものが見える



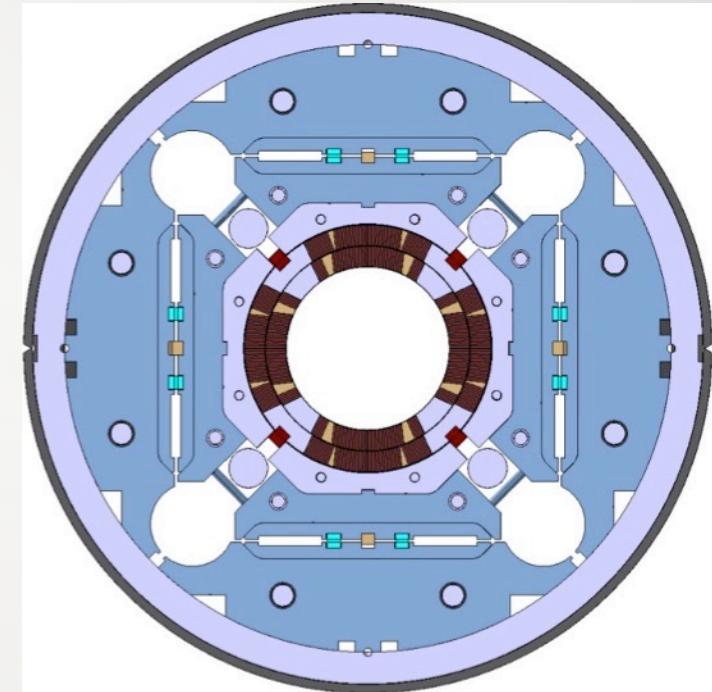
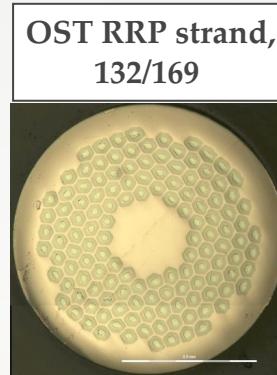
将来に向けて HL-LHC



- 衝突点のアップグレード
 - 衝突点のビームサイズを小さくする
 - 4極磁石の高性能化 (Nb_3Sn)
 - クラブキャビティを入れる
 - ビーム分離磁石の高磁場化
 - 常伝導磁石から超伝導磁石へ
 - これらの更新で衝突確率を上げる

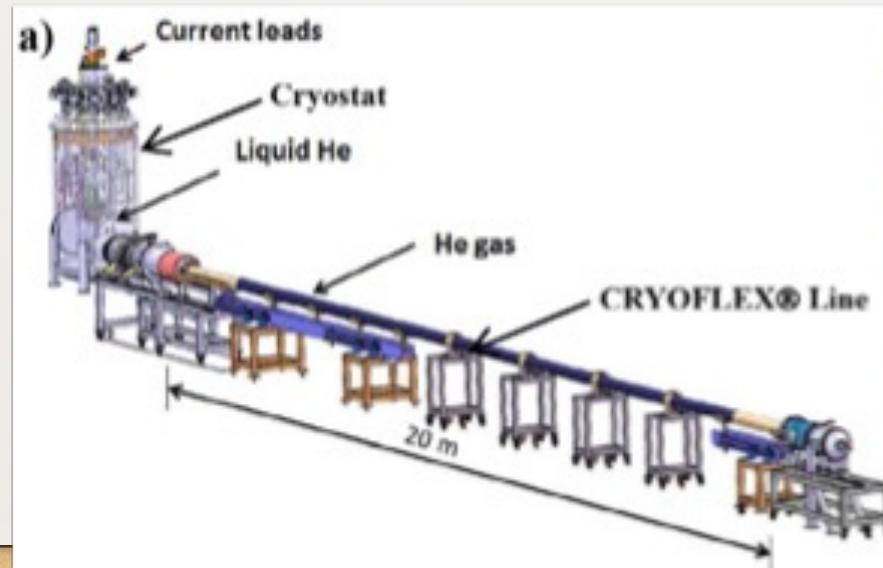
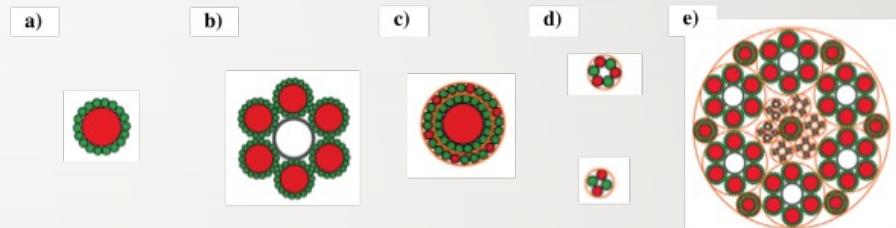
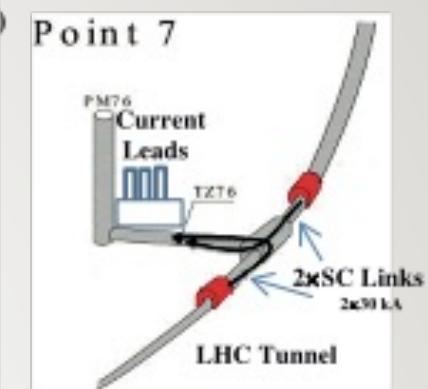
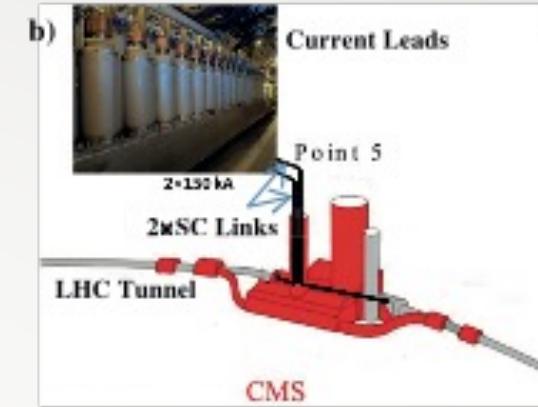
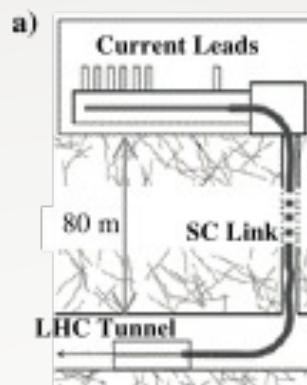
衝突点4極磁石の更新 Nb_3Sn による高磁場化

- Nb_3Sn を使い最高磁場11.4T実現
- Wind and React 法



超伝導送電線

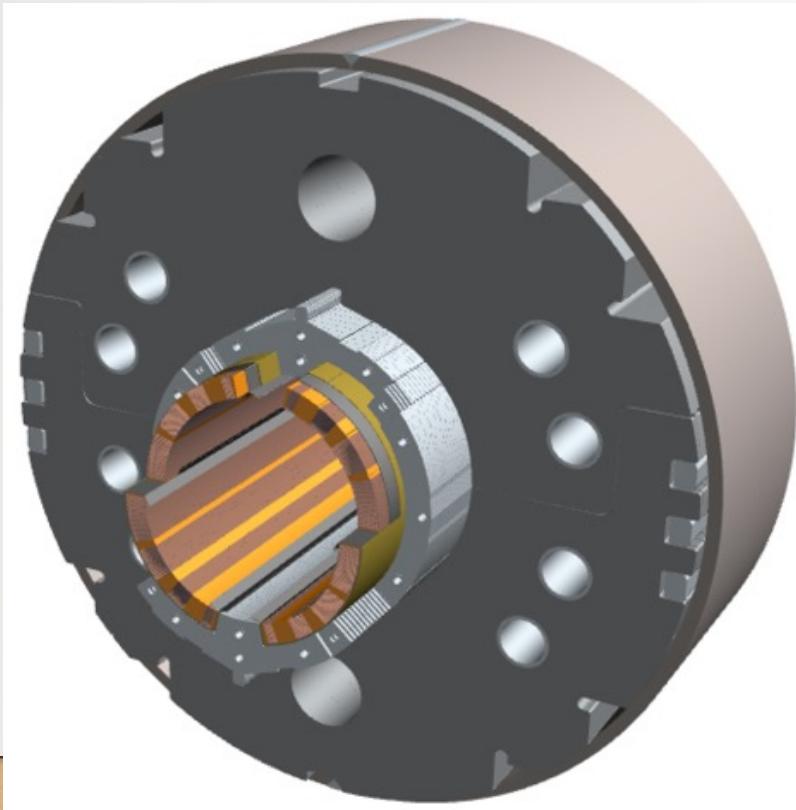
- Transmission line system for HL-LHC.
- Default MgB₂
- Option HTS



"Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine," A. Ballarino, *Supercond. Sci. Technol.* 27, 2014, 044024.

ビーム分離磁石の更新 KEKでの開発

- ビーム分離磁石の超伝導化：大口径150mm, 6Tの2極磁石の開発



HL-LHC D1 Magnet



協定書に署名したファビオラ・ジャノッティ
CERN所長と山内正則KEK機構長

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- **ハドロン加速器での応用**
 - **J-PARC, GSI/FAIR**
 - 医療用シンクロトロン
 - サイクロトロン
 - イオン源
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

大強度ハドロン加速器 J-PARC加速器

- J-PARCなど取り出し加速器が多い
 - シンクロトロンだと運転サイクルが速くなるため超伝導が難しい。
 - J-PARC RCS (3GeV 1MW) : 25 Hz
 - J-PARC MR (30GeV 1MW): ~1 Hz
- 取り出した後はエネルギー=磁場一定なので超伝導が使いやすい
 - J-PARCニュートリノ施設

常電導磁石システム：大量に水を使うので水のトラブルは多い



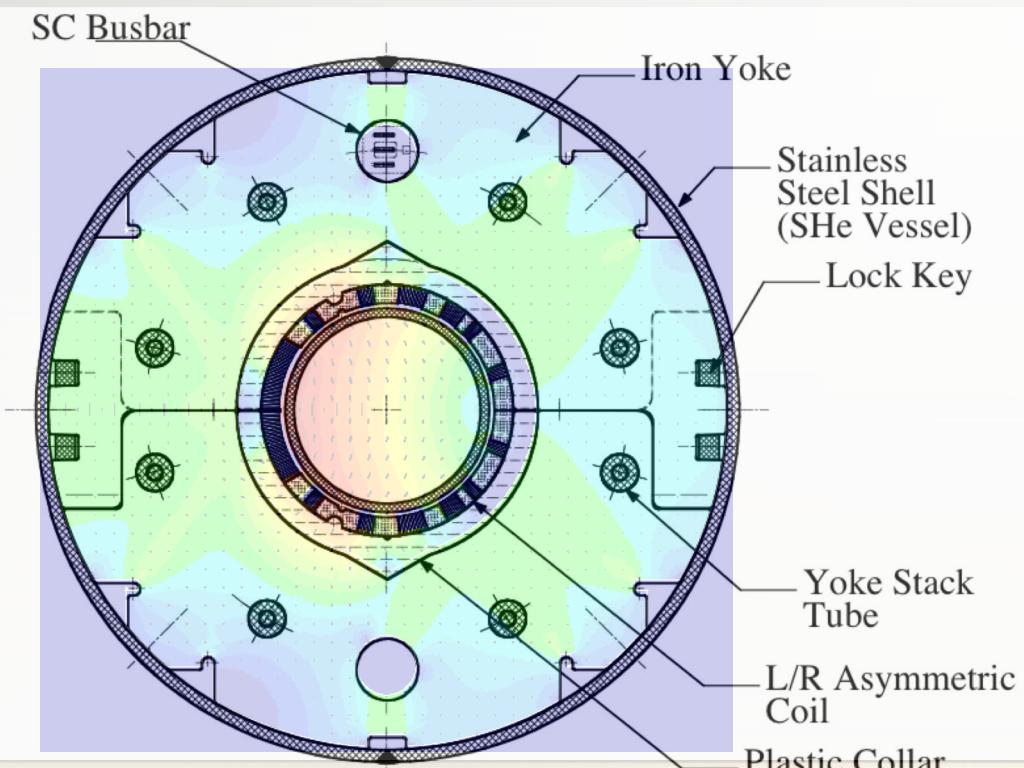
J-PARC RCS Magnets



J-PARC MR Magnets

大型ハドロン加速器 J-PARC ニュートリノ施設

- ニュートリノ実験施設：場所が狭く超伝導が必要

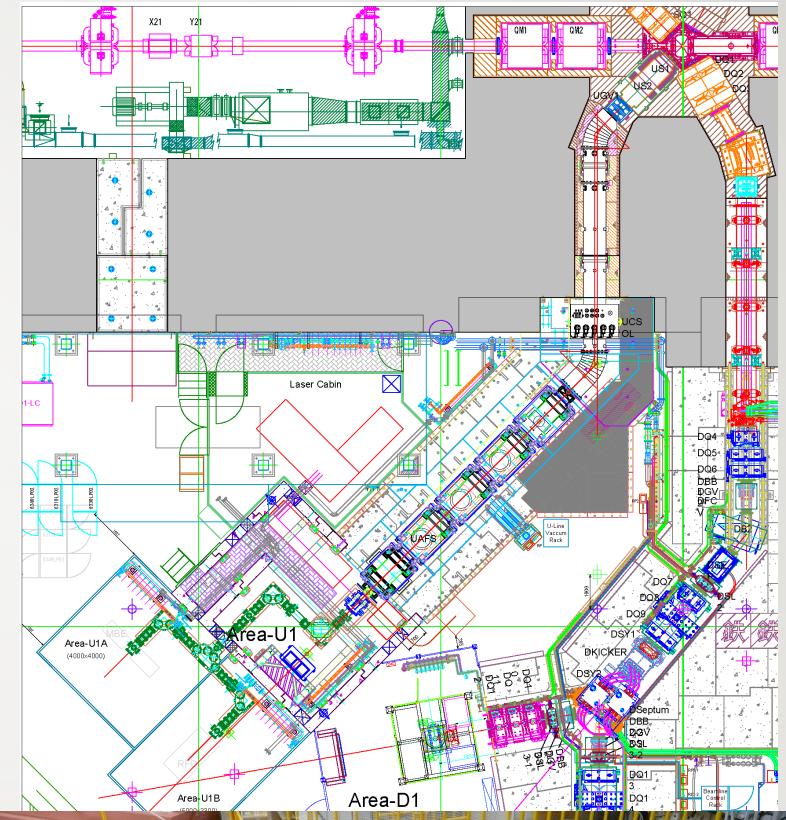


超伝導結合機能型磁石 (2.6T+19T/m, 28台) で予算と工期を最適化

Super- Ω



Superconducting Curved Solenoid

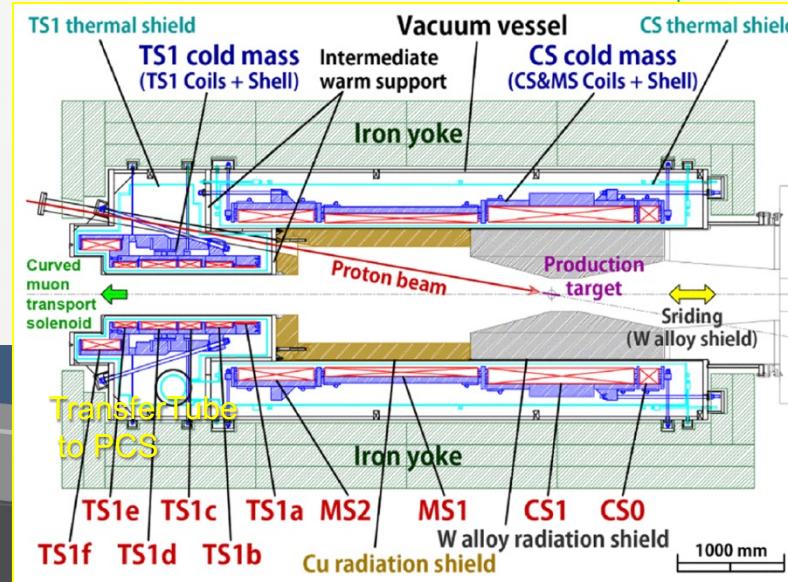
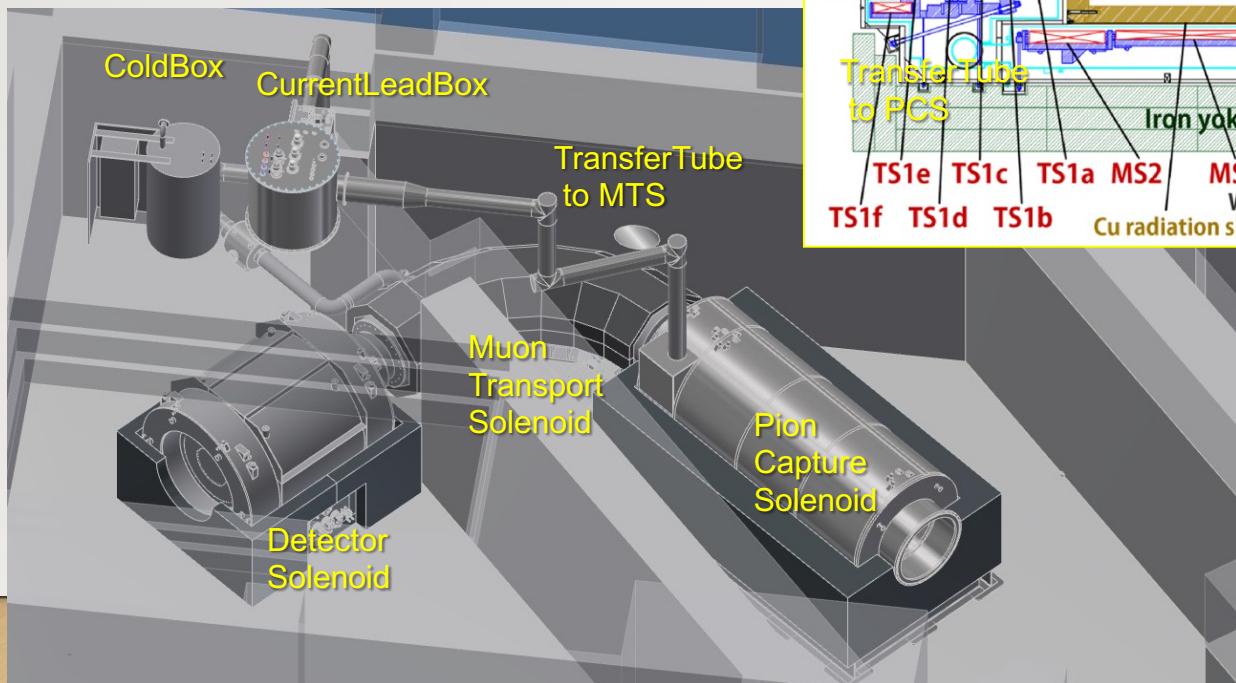


Superconducting Focusing Solenoids



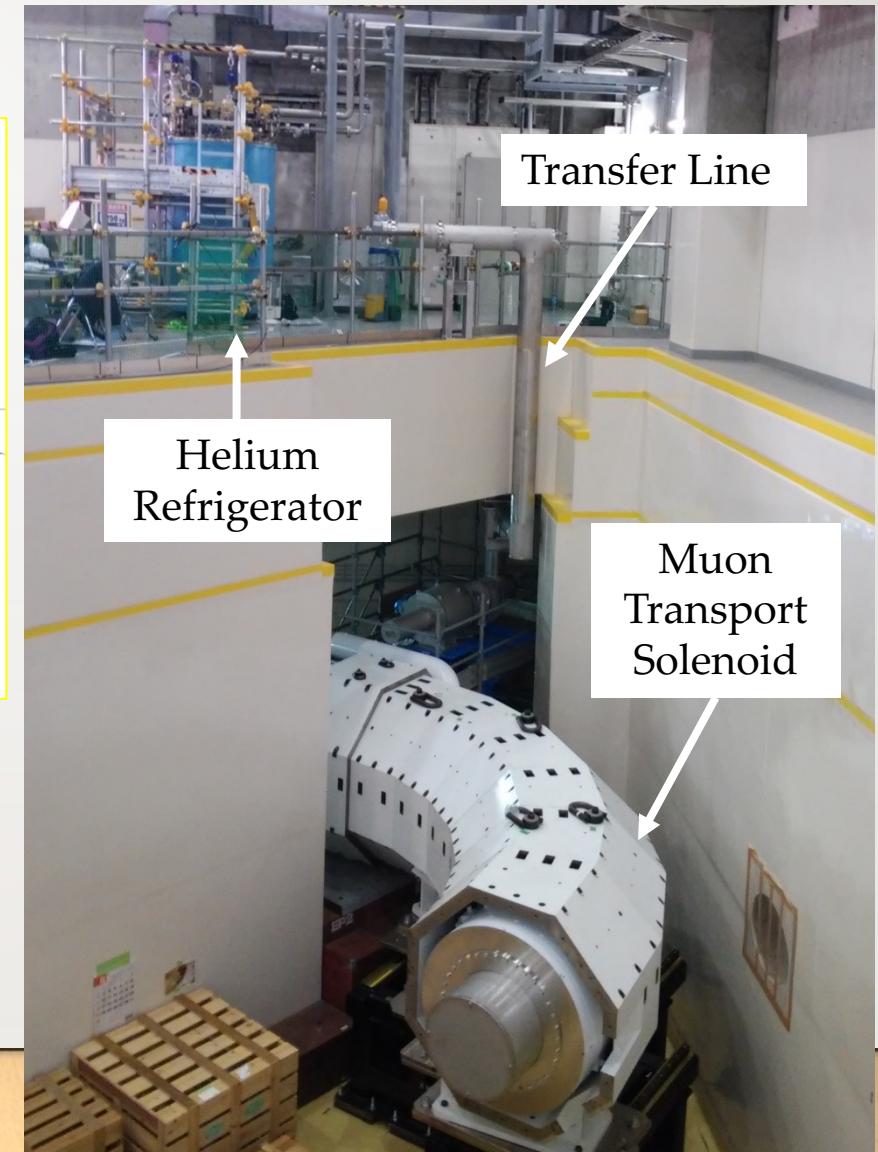
COMET at J-PARC

標的からの二次粒子(Muon)を
ソレノイド磁場で大立体角で
捕獲し大強度二次粒子を得る



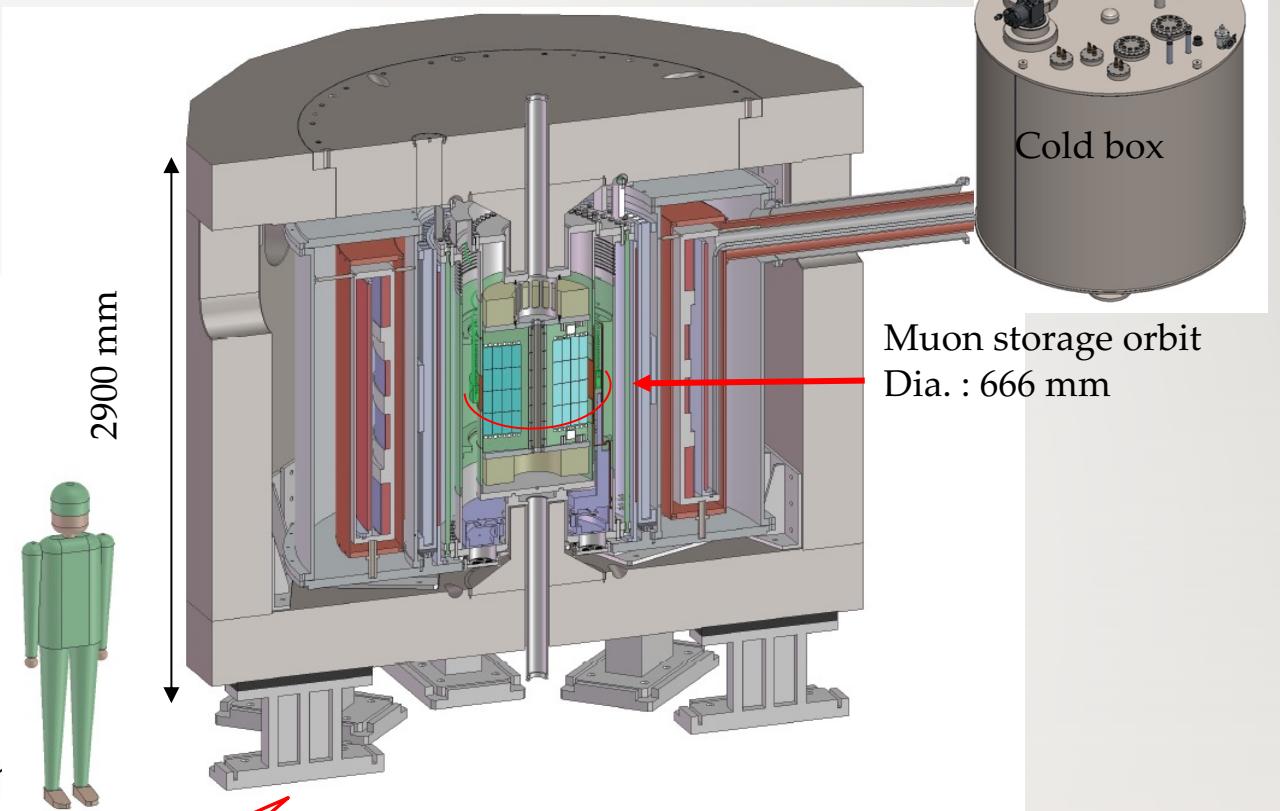
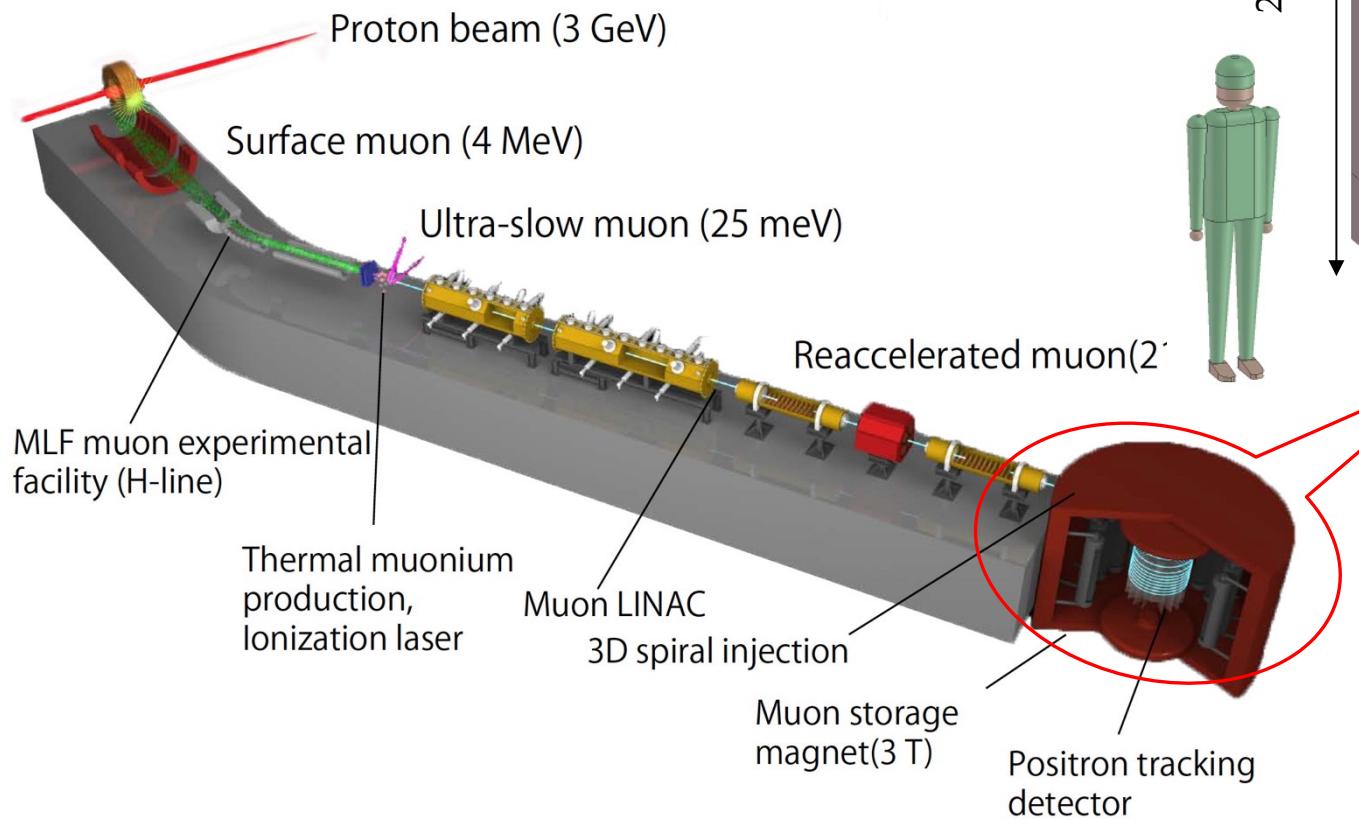
Support to J-PARC Projects

COMET SC Magnet System: Helium Transfer Line to Muon Transport Solenoid is under construction.

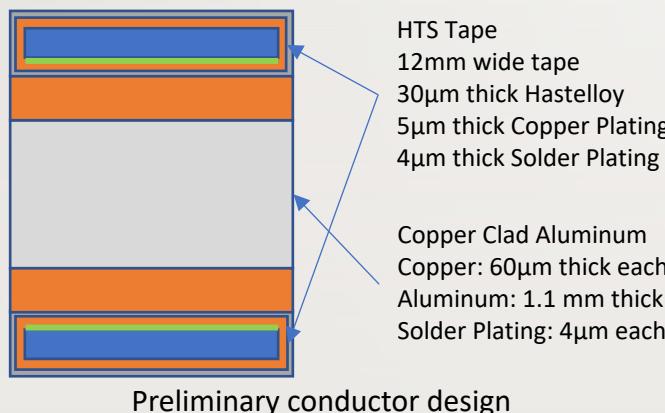
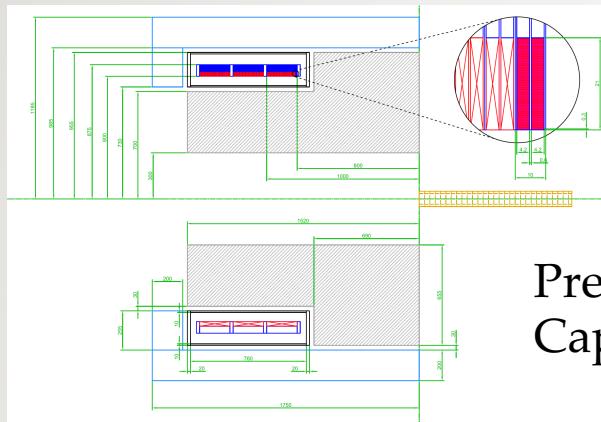


J-PARC g-2/EDM

高磁場精度(sub-ppm)のソレノイドにMuonを蓄積し
Muonの磁気能率や電気能率を超高精度で測定する

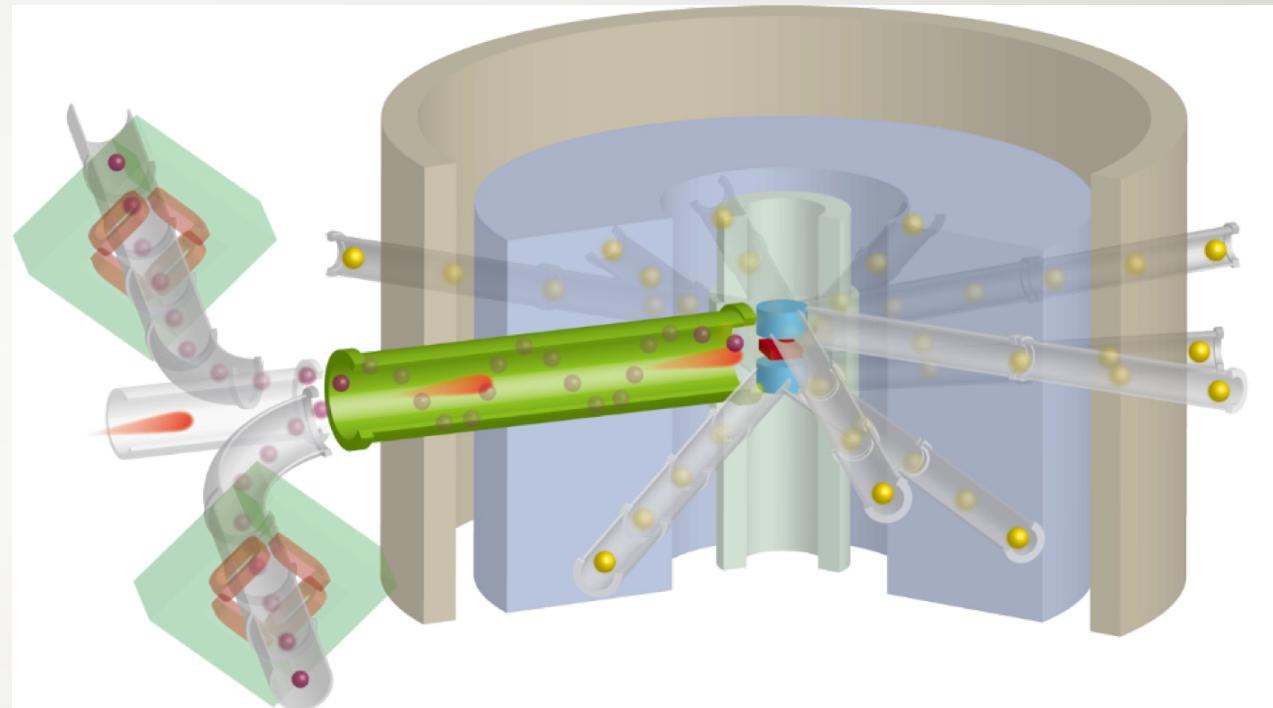


HTS線材応用の可能性 高放射線環境での応用



Parameter	Value
Coil Inner Diameter	1600 mm
Coil Thickness	55 mm
Coil Length	600 mm
Operation Current	1200 A
Peak Field @solenoid axis	1.12 T
Peak Field @coil	2.41 T
Peak Field B//ab	2.09 T
Peak Field B//c	2.25 T
Inductance	~4 H
Total conductor length	~7km

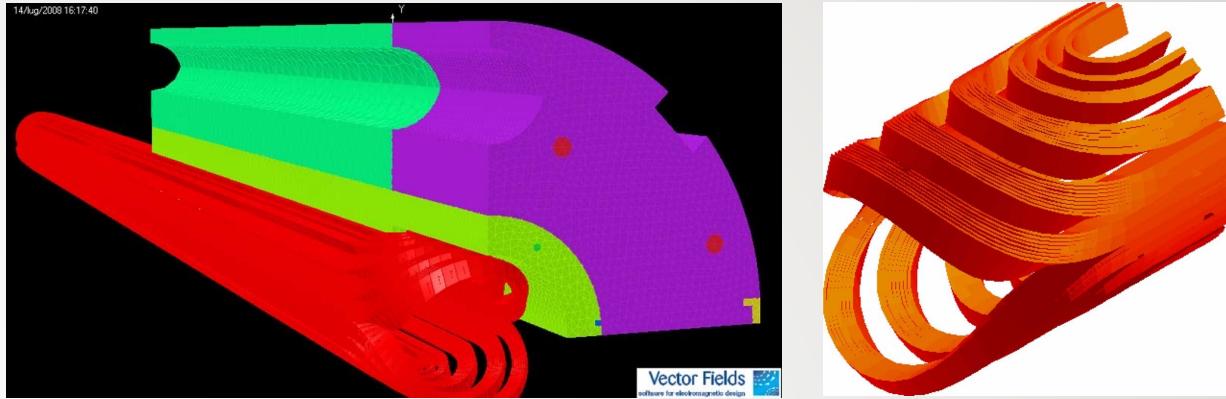
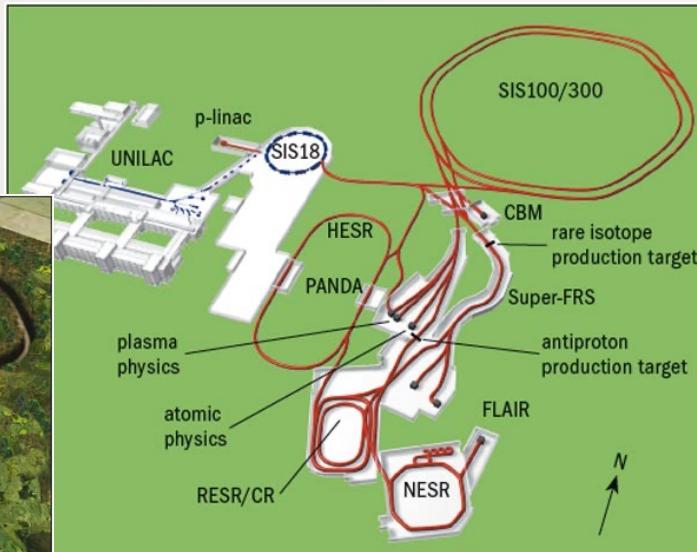
Secondary Particle Capture Solenoid



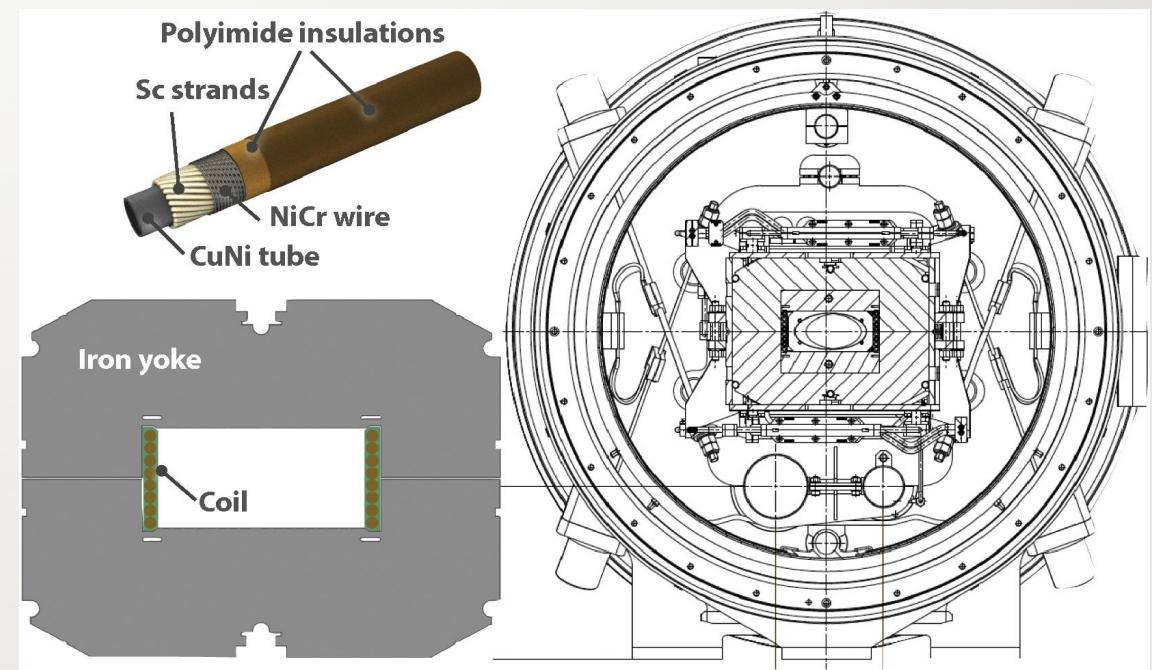
- LTSでは使えなかった高熱負荷条件での応用
= 高放射線環境での高磁場磁石
 - コライダーの衝突点磁石 (FCC)
 - 固定標的での二次粒子捕獲 (J-PARC)

GSI/FAIR

- SIS100
 - スーパーフェリックで1.9T 1Hz (4T/s)を実現
- SIS300
 - COSθ, 4.5T, 1T/s (Flattop 10sec)



EM design and coil end of SIS300 dipole magnet



GSI SIS100 Main Dipole Magnet

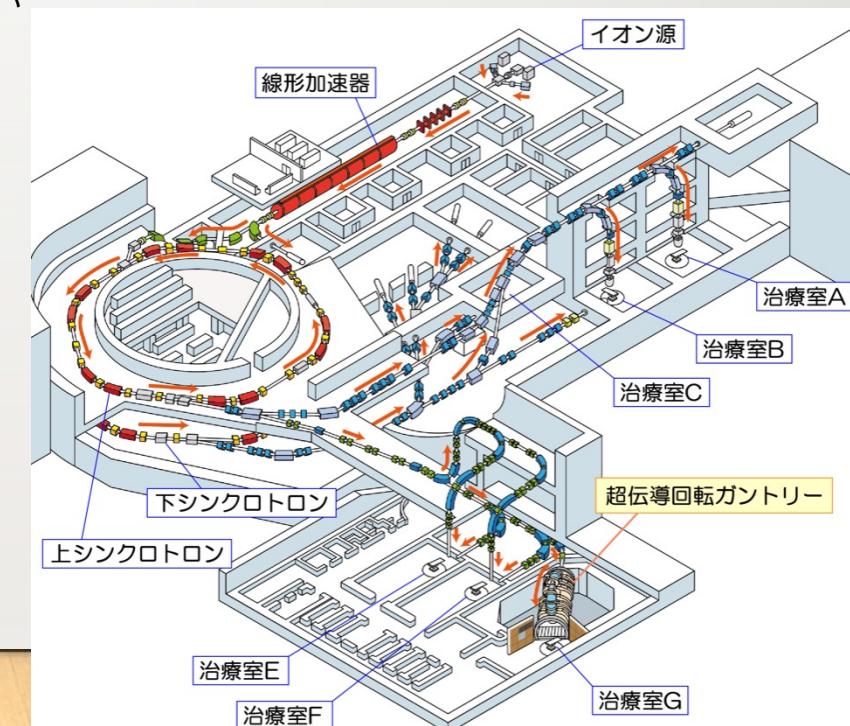
- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- **ハドロン加速器での応用**
 - J-PARC, GSI/FAIR
 - **医療用シンクロトロン**
 - サイクロトロン
 - イオン源
- 電子加速器
- 将来計画
- まとめ

放射光・医療用・小型加速器応用 医療用加速器

- 重イオン加速器ではシンクロトロンが主流
 - 取り出しシンクロトロン：エネルギー可変が容易、取り出しでのロスが少ない
 - サイクルは速くなるのでACロス等から超電導化が難しい



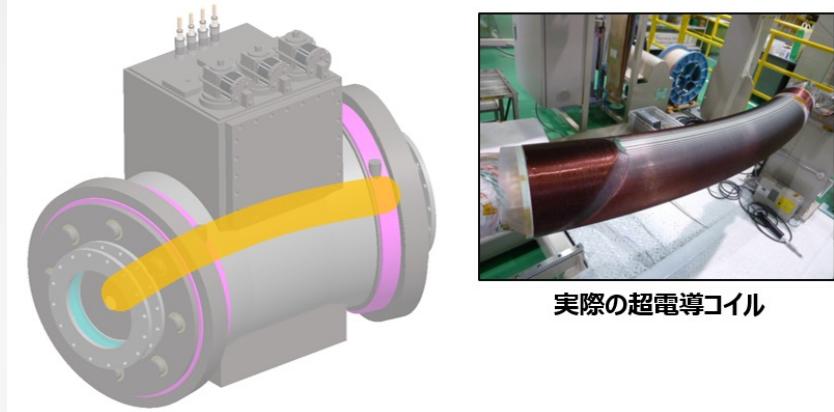
世界初の重イオン加速器治療を行なったLBNLのBevalac



放医研のHIMAC

医療用加速器 超電導ガントリー

小型軽量化を目指して超電導化を実現
エネルギー可変に対応するためAC対応超電導線を利用

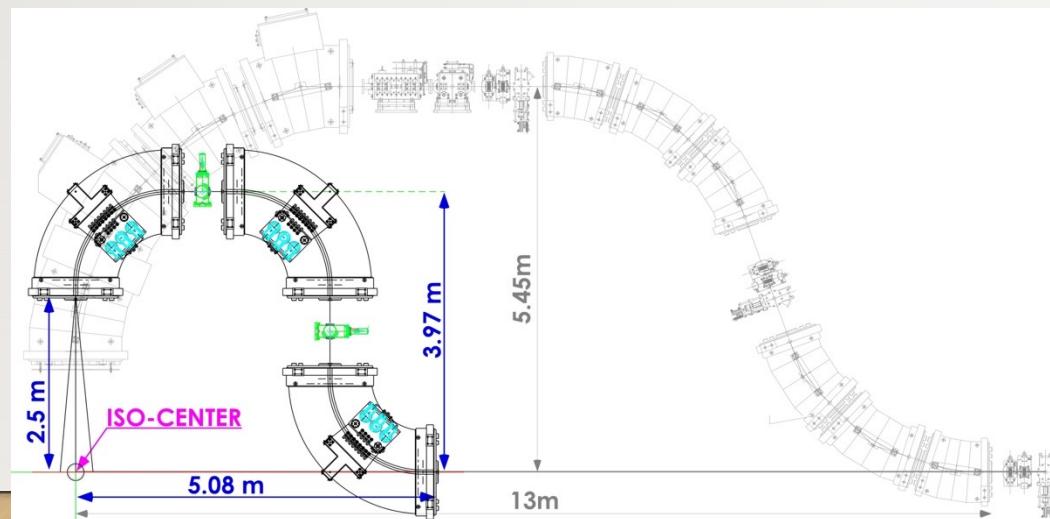


ガントリー用超電導コイルのイメージ
(オレンジの部分)

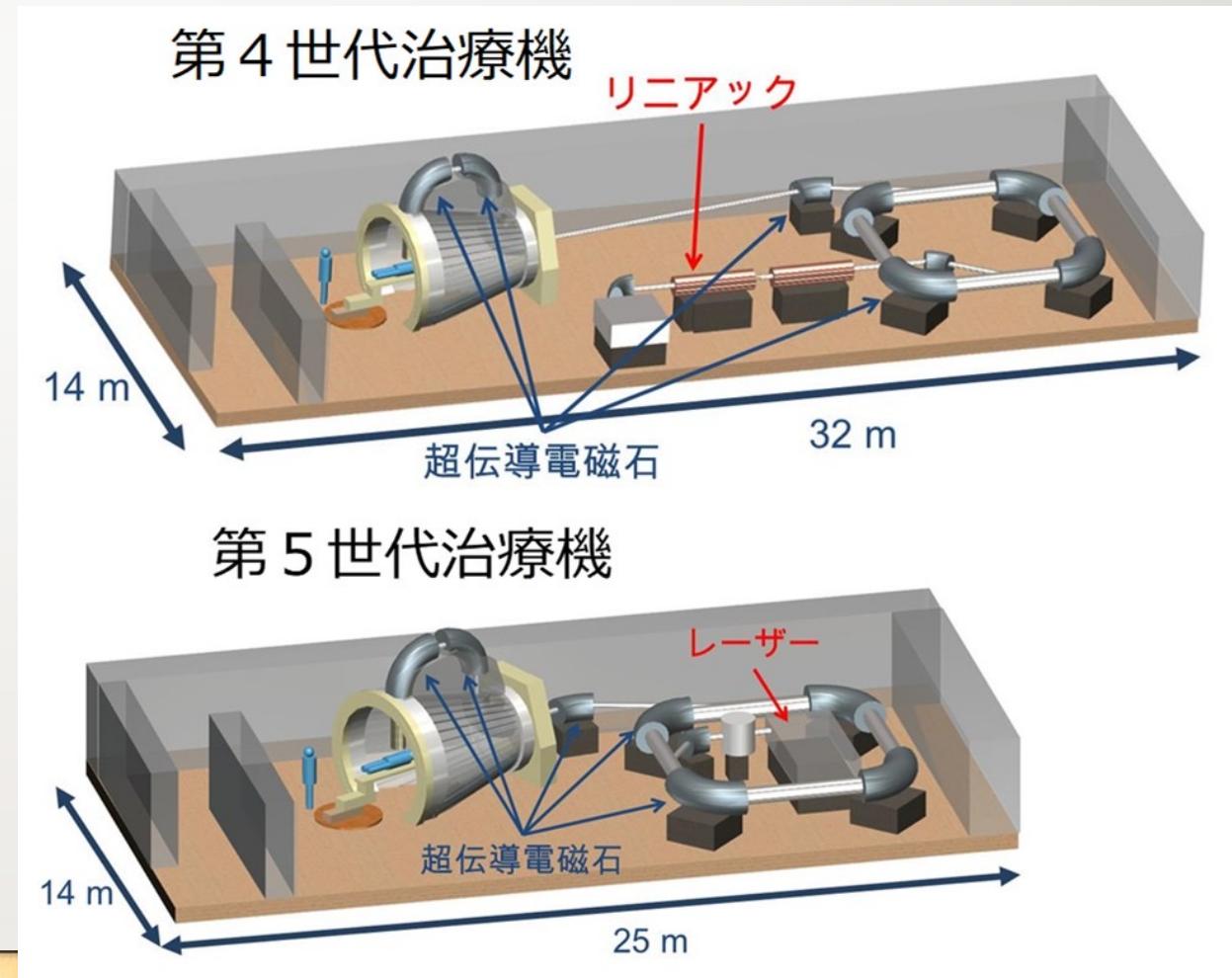


技術開発の方向性 普及型医療用加速器

- ・小型化に向けた超電導化
- ・小型冷凍機が必須
- ・建設費、維持管理費の削減



放医研の超電導回転ガントリーと、
超小型超電導回転ガントリー

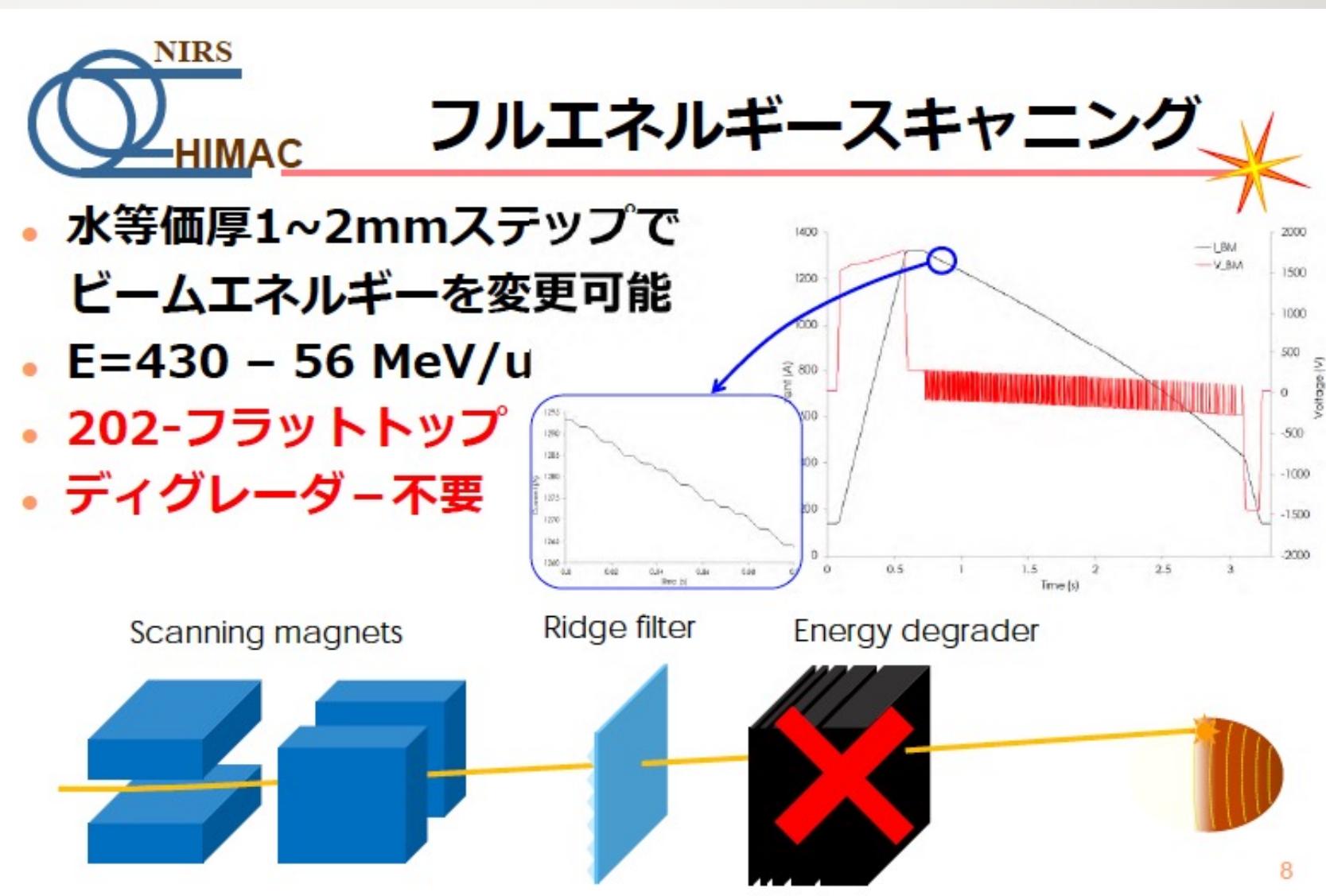


次世代ガン治療用重イオン加速器システムのイメージ

技術開発の方向性

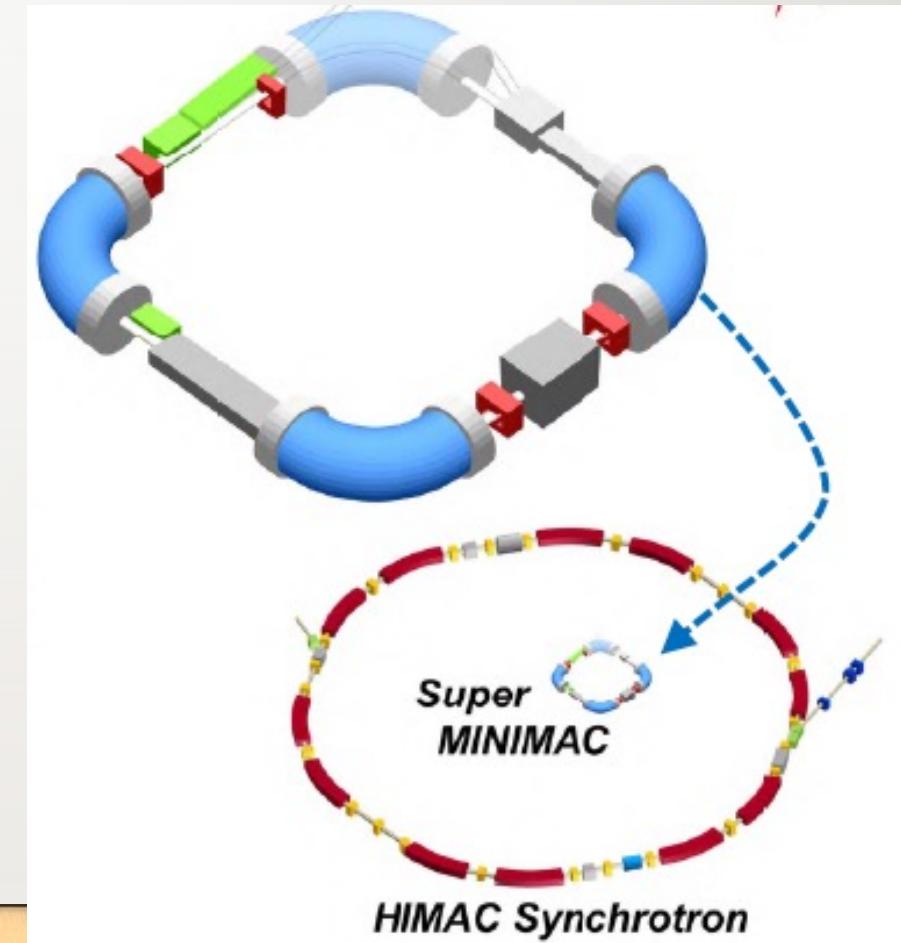
医療用加速器 エネルギー スキャン

- ・シンクロトロンも
ガントリーも早い
繰り返しが必要
- ・シンクロロは一回の
入射で治療が完了
しないと2倍のサイ
クルが必要
- ・ACロスや誤差磁場
の制御が必要



技術開発の方向性 速いサイクルへの対応

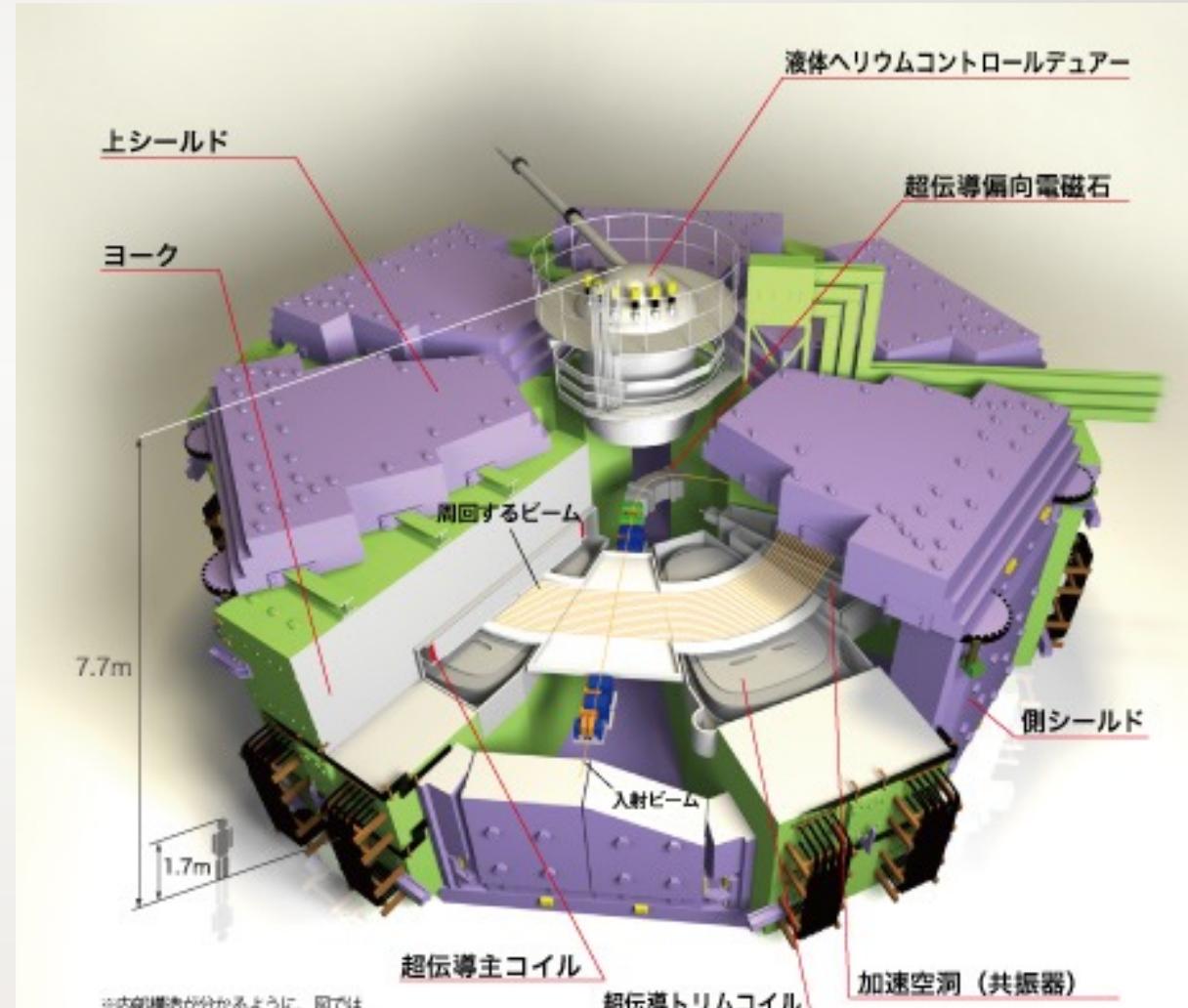
- 大強度ハドロン加速器や医療用重イオン加速器など
 - 高磁場化による小型化メリットが大きい
 - 高繰り返し運転に対応できる超電導加速器電磁石?
 - GSI SIS100や放医研のガントリーなど
 - 高温超伝導の可能性?
 - 温度マージンが大きい：高熱負荷に強い
 - 高い運転温度による冷凍機の高効率化
 - ✓ ACロスを適切に制御できるか？
 - ✓ 遮蔽電流による誤差磁場の制御



- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- **ハドロン加速器での応用**
 - J-PARC, GSI/FAIR
 - 医療用シンクロトロン
 - **サイクロトロン**
 - **イオン源**
- 電子加速器
- 将来計画
- まとめ

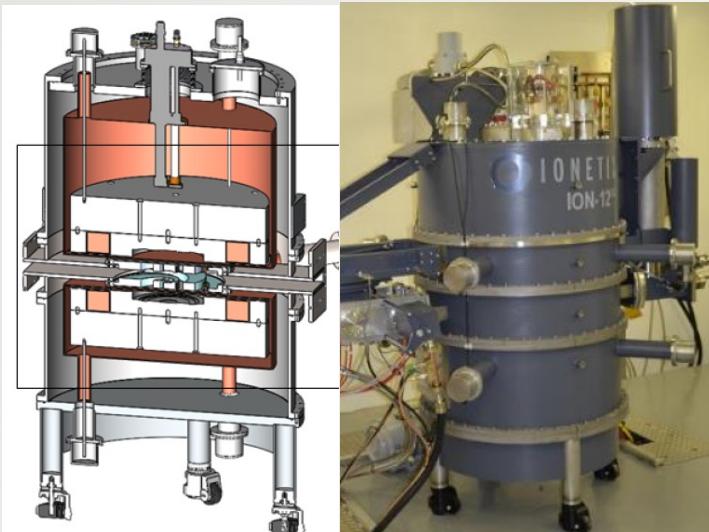
RIKEN SRC

- RIKEN SRC (0.4GeV 80kW)
 - 世界最大の超電導サイクロトロン
 - DC運転

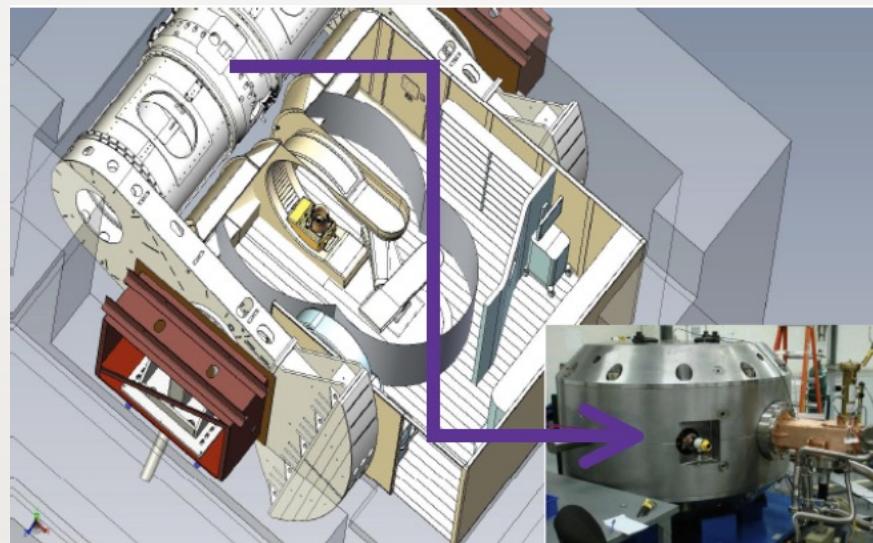


小型加速器など 超電導サイクロトロン

- DC運転なので超電導にあう。
- 高磁場化による小型化
 - ビームセパレーションが小さくなつて取り出しが難しくなる:ビームロスが多い



同位体生産用超小型サイクロトロン
Beta Installation at the University of Michigan



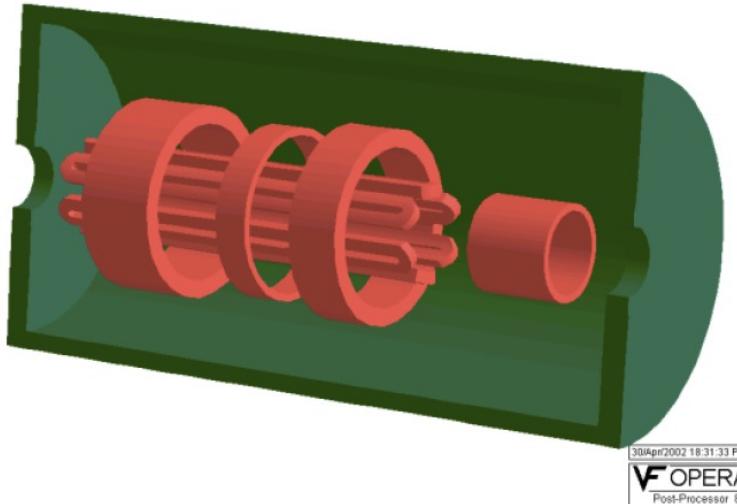
ガントリー搭載型超電導シンクロサイクロトロンMevion S250



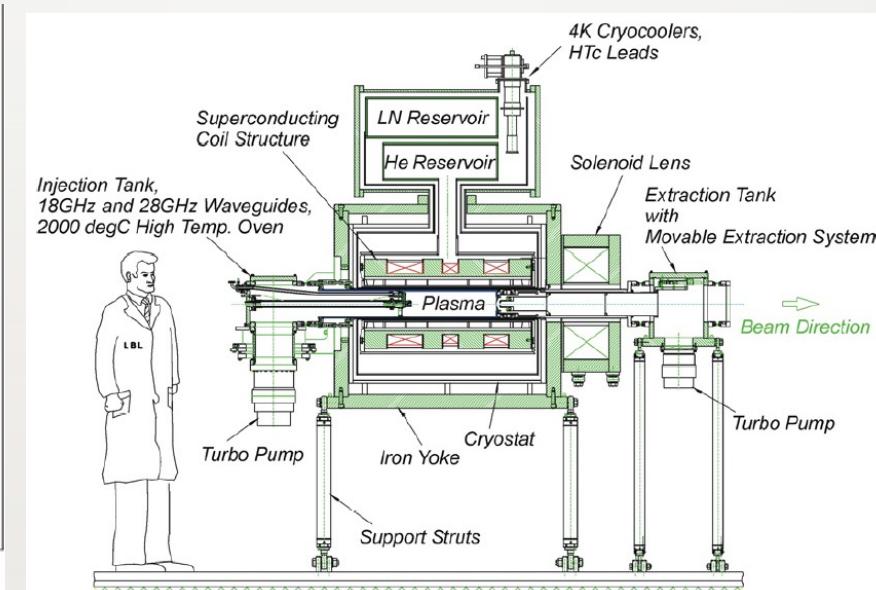
IBAで開発された超電導シンクロサイクロトロン

小型加速器など ECRイオン源、Klystron

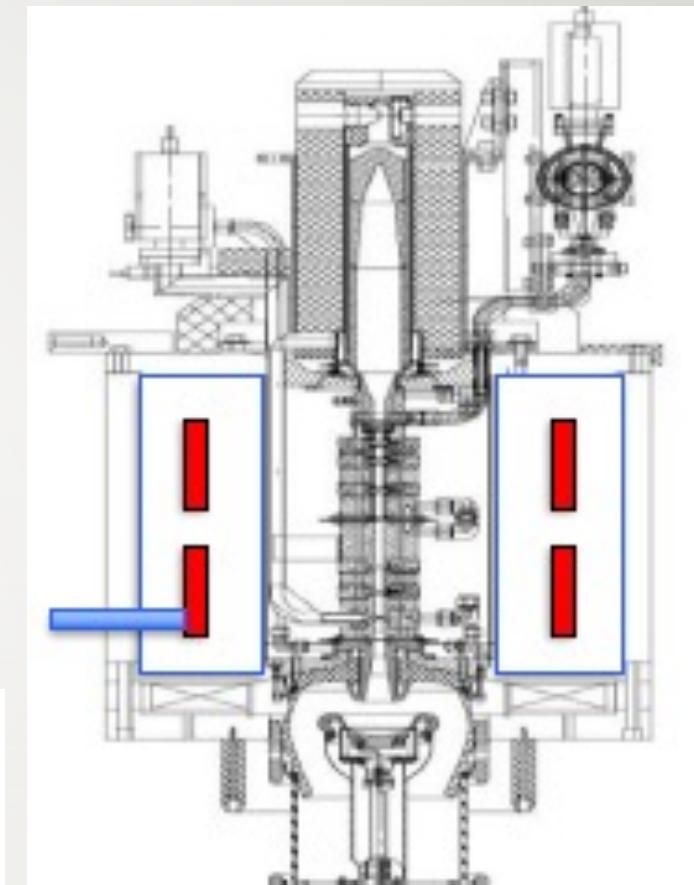
- 大強度イオンを得るために高いプラズマ閉じ込め能力を持つソレノイド磁場と6極磁場を利用



GyroSERSEのソレノイドと六極コイル
のOPERA-3Dモデル



バークレー研究所のVENUSイオン源の
断面図

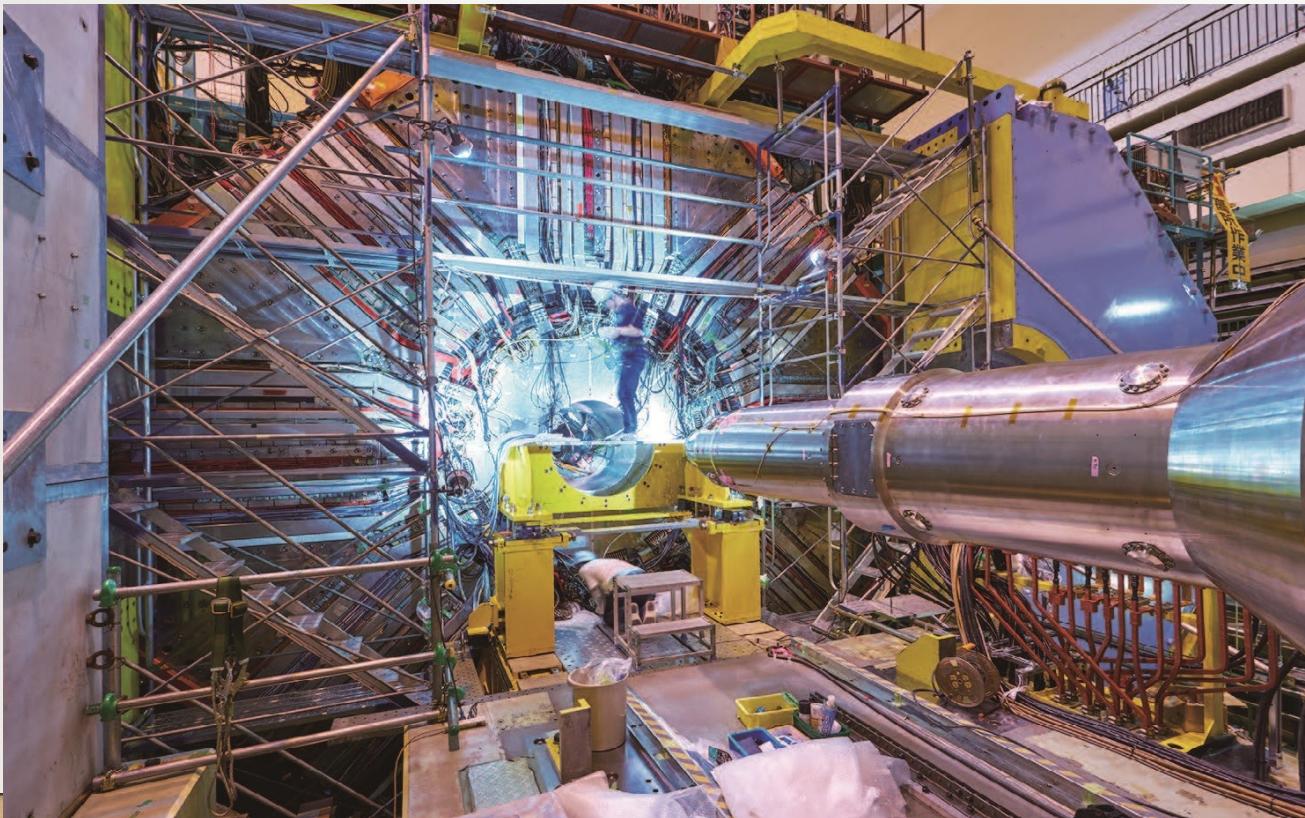


CERN CLIC Klystron用
超伝導収束ソレノイド

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- **電子加速器**
 - **電子・陽電子衝突型加速器**
 - 放射光施設
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

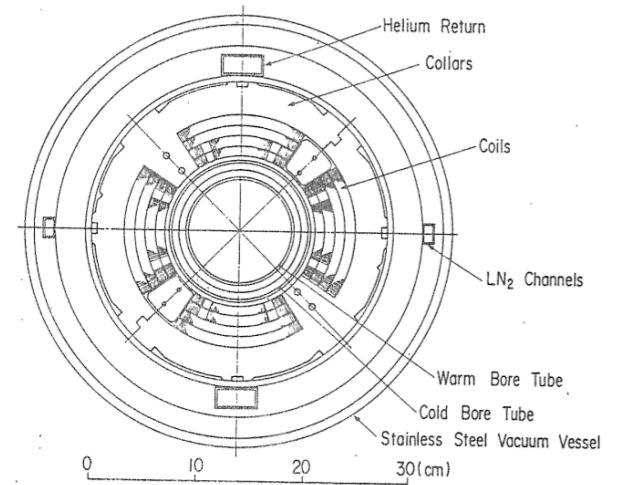
日本の衝突型加速器と超電導電磁石 TRISTAN, KEKB, S-KEKB

日本では電子一陽電子衝突型だけ：超電導は衝突点だけ

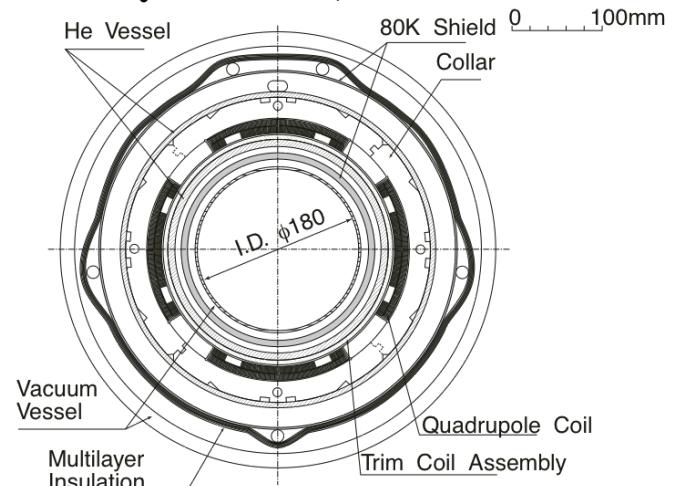


SuperKEKB 衝突点用超伝導磁石システム

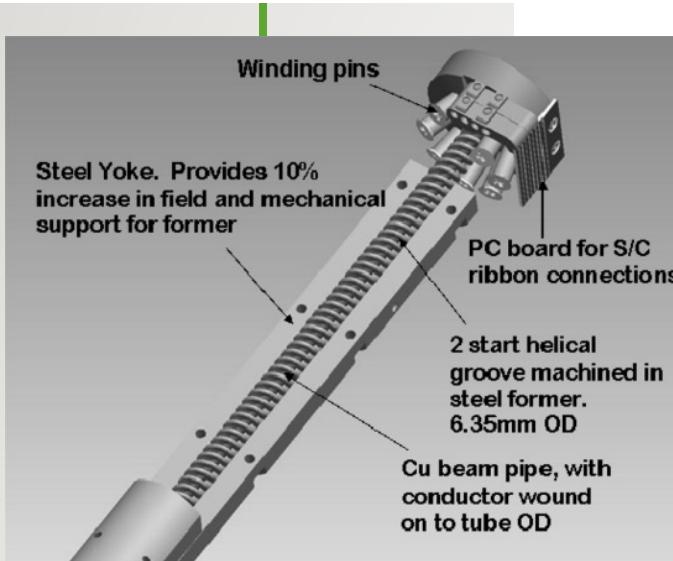
b) TRISTAN QCS(70T/m, 4.5K)



c) KEK-B QCS(22T/m, 4.5K)



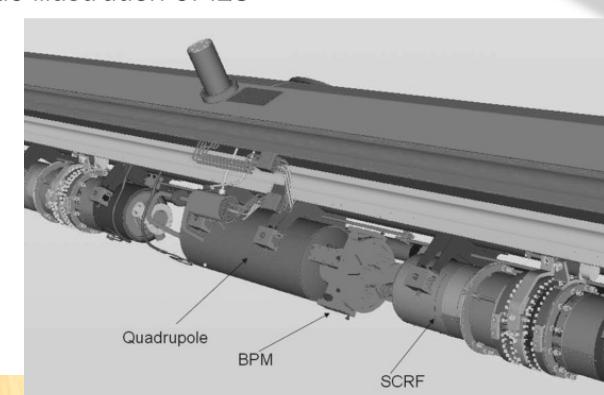
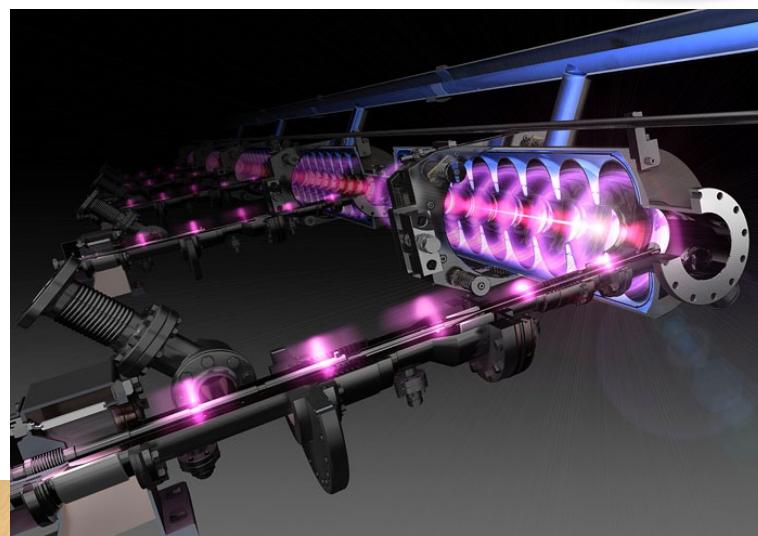
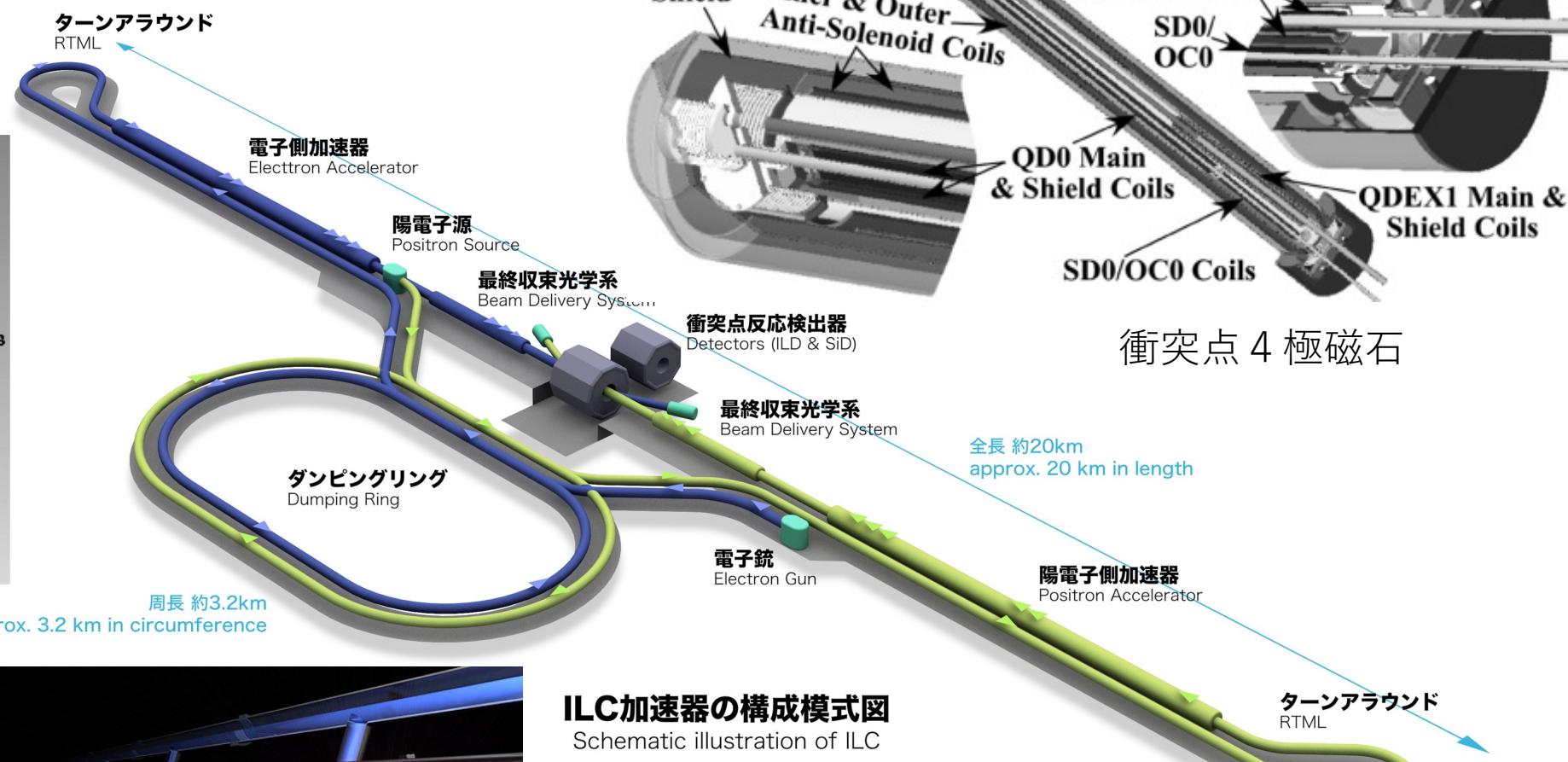
ILCと超伝導磁石



アンジュレーター

ILCにおける磁石ビームを細く保つために重要な働き

高磁場は必要ない

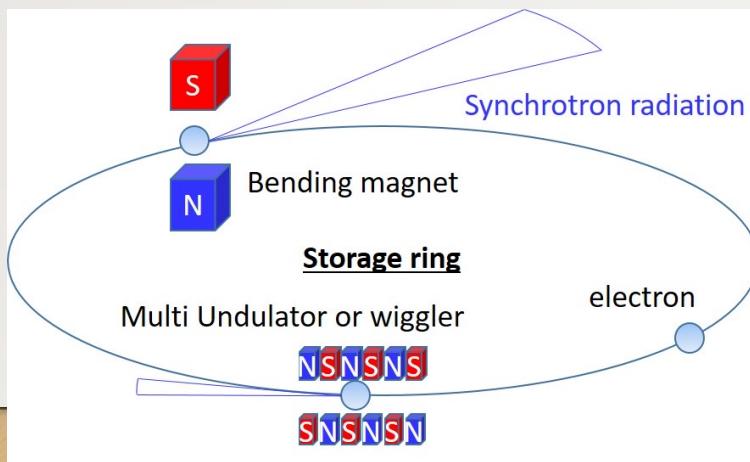


直線部 4 極磁石

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- **電子加速器**
 - 電子・陽電子衝突型加速器
 - **放射光施設**
- 検出器磁石
- 将来計画
- まとめ

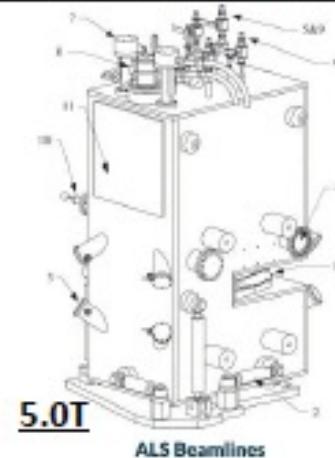
放射光加速器

- Super-Bend
- 古典的
- 高輝度化、低エミッタンス化、高コヒーレンス化などで不利？



超電導電磁石Super-Bend(SBM)による高エネルギー高輝度X線(古典的な硬X線生成策)

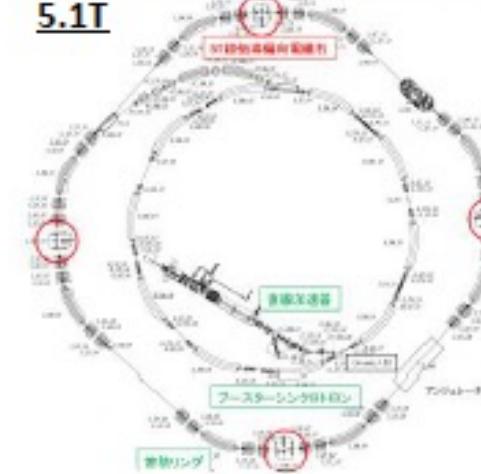
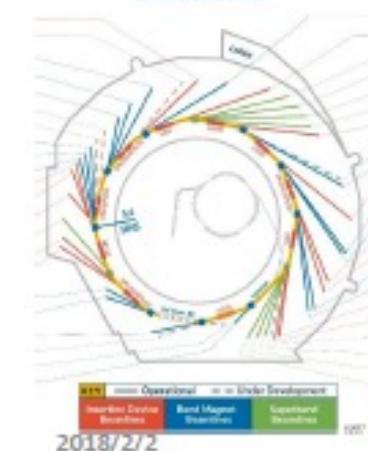
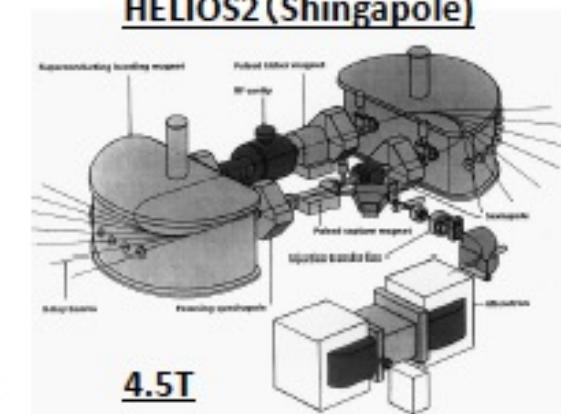
ALS(SBM先駆的な施設)



AichiSR



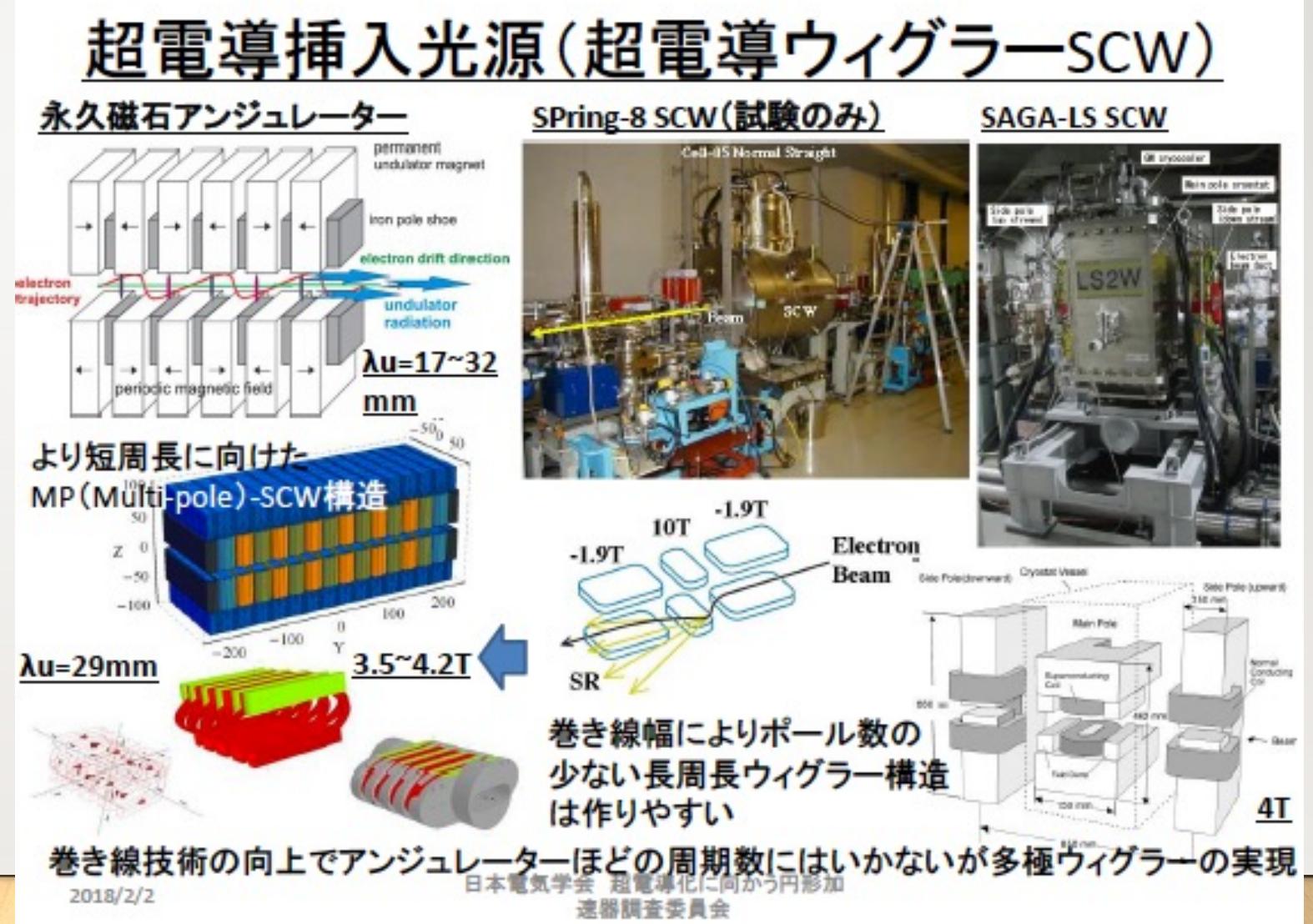
HELIOS2(Shingapole)



日本電子子云 磁電導化による高エネルギー
速器調査委員会

放射光加速器

- ・ ウィグラー
- ・ 超電導化による高磁場化

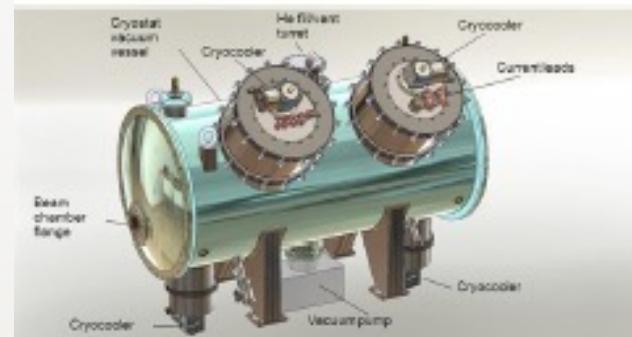


放射光加速器

- 超電導アンジュレーター
- 競合技術（永久磁石）に勝てるか？

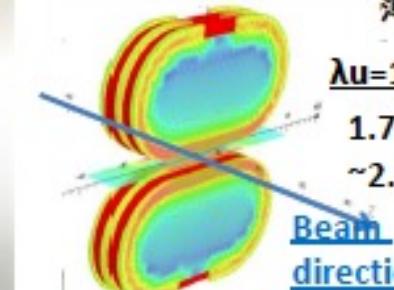
超電導アンジュレーター(SCU)

短周長化に向けた超電導アンジュレーターの開発が進む



短周長超電導アンジュレーター実現

- ↓
- 高輝度化と同時に
 - 高エネルギー側輝度の底上げ可能(高エネルギー側Fluxの利用が可能)→高エネルギー化も促進
 - 短周期で周期数(ポール数)を上げることで光束密度を増加可能



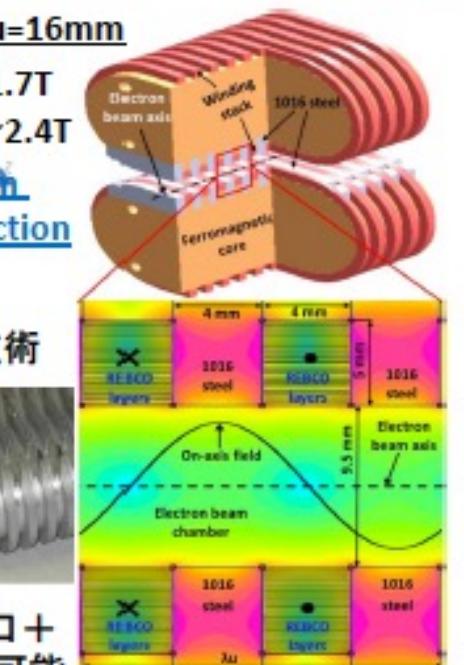
高電流密度
Nb₃Sn線材巻き線技術



固定ギャップ+大開口+省スペースで実現が可能

HTC-SCU

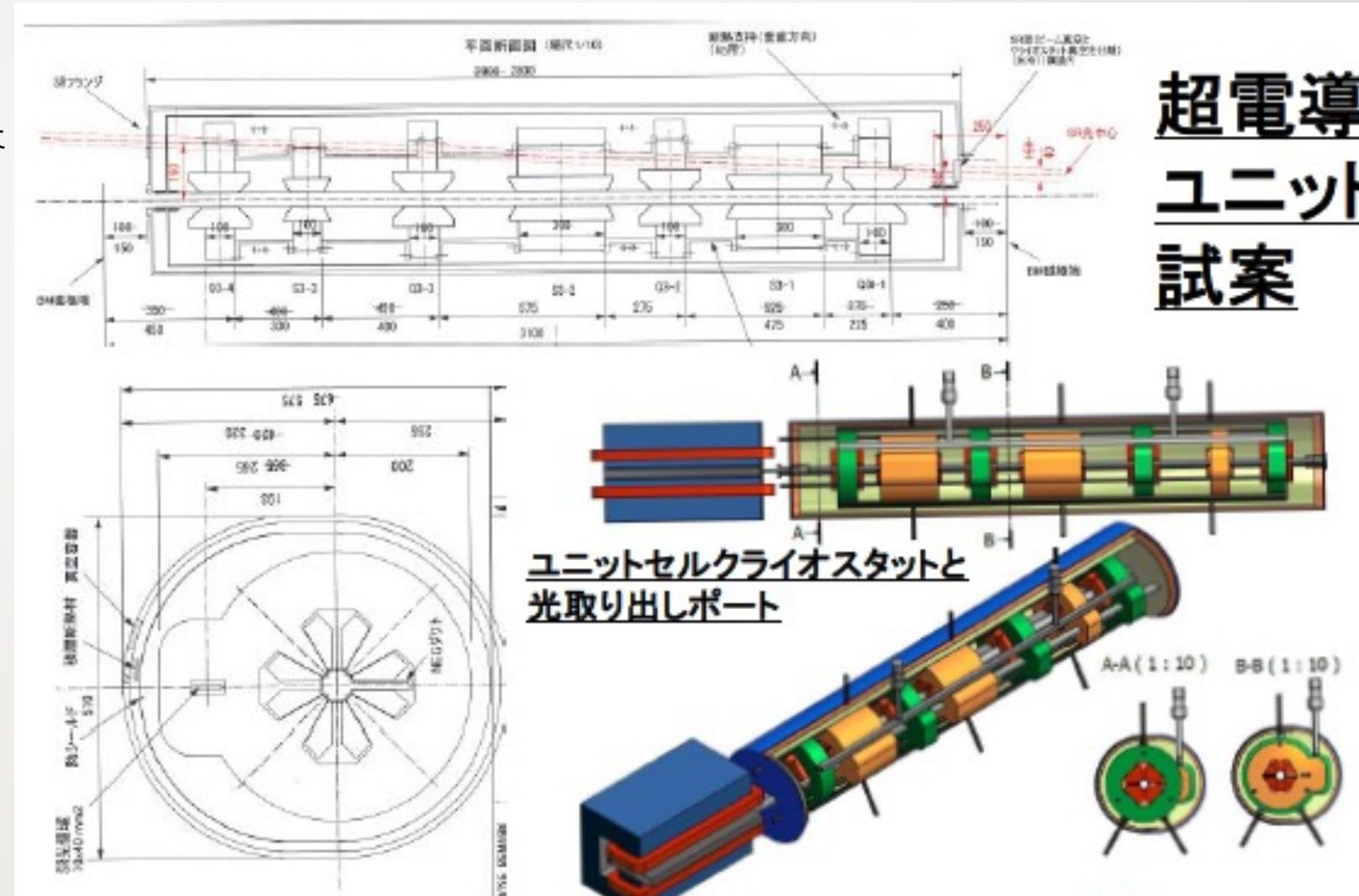
薄膜化テープ線材巻き線技術



放射光加速器

- 収束系電磁石の高密度化が求められている。
- 超電導化による高磁場化に可能性

超電導 ユニット 試案



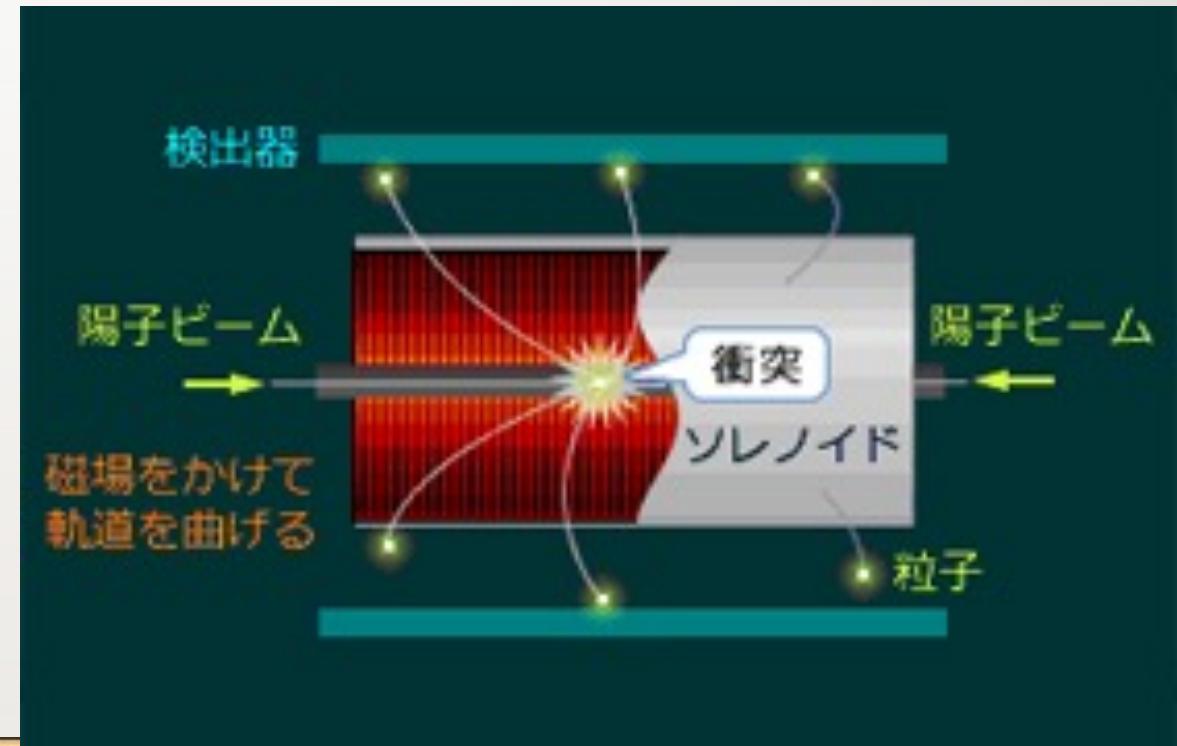
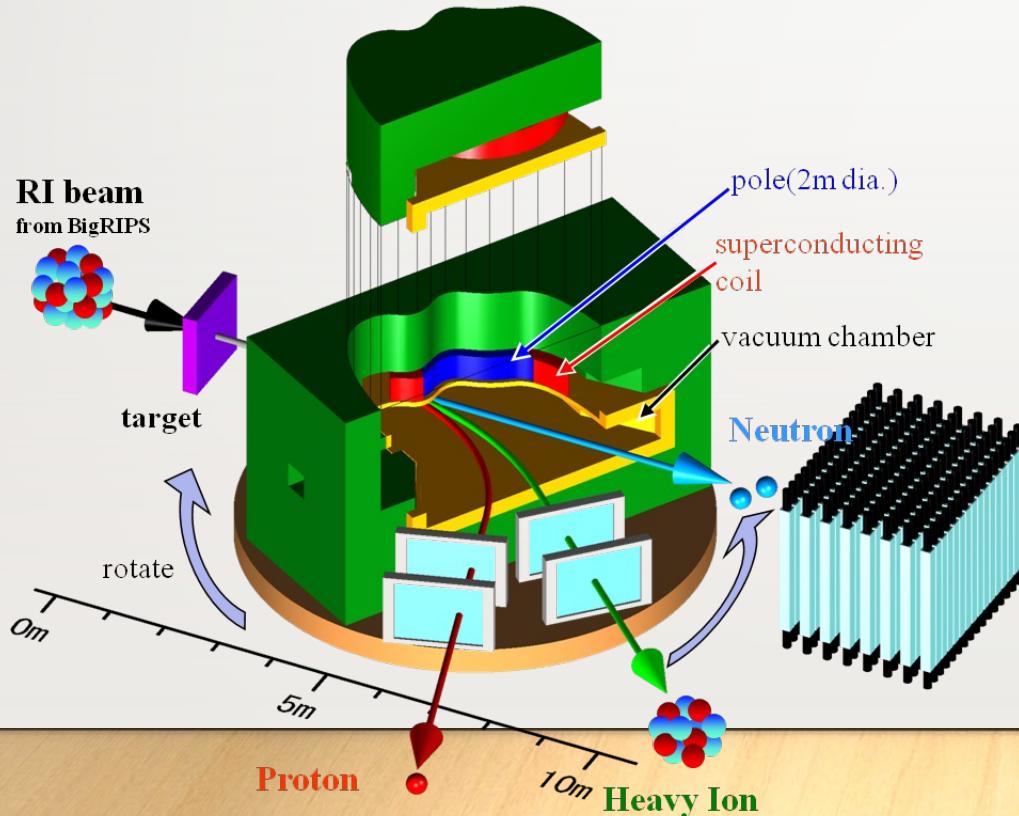
Iron coreを使用するSuperfericによる超電導電磁石列ユニット

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- **検出器磁石**
- 将来計画
- まとめ

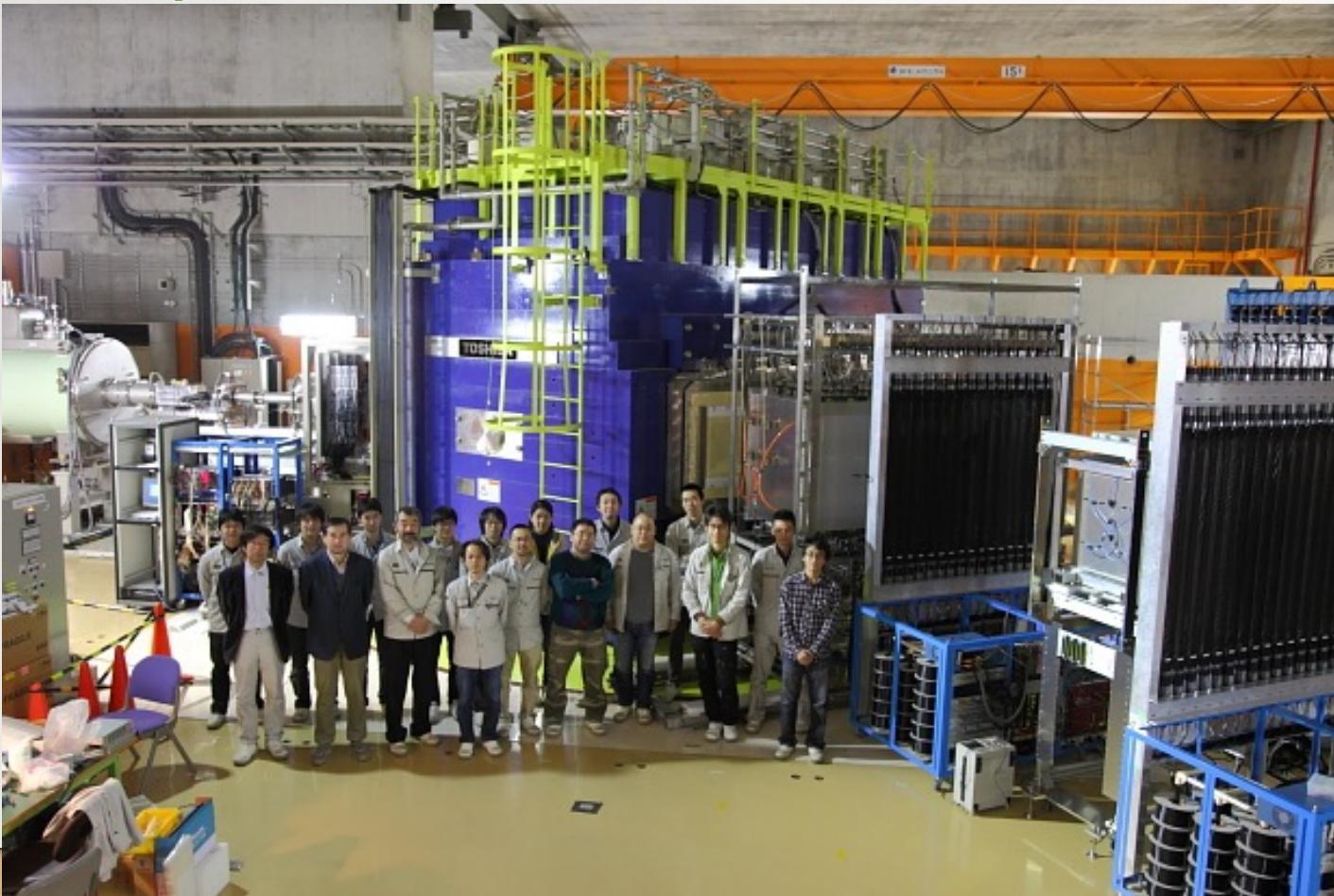
検出器磁石

スペクトロメーター・検出器ソレノイド・トロイド

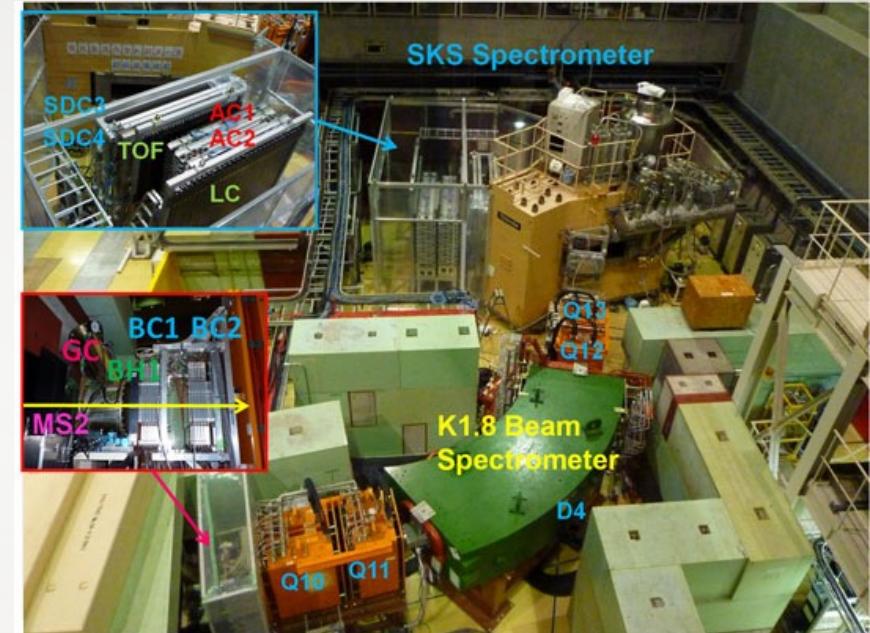
- 粒子の電荷と運動量を磁場で仕分ける



検出器磁石 超伝導スペクトロメーター



理研仁科センター SAMURAI



J-PARC SKS

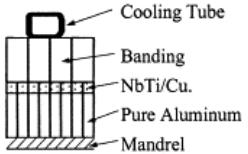
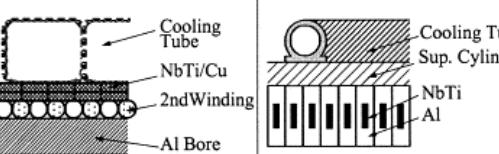
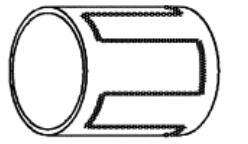
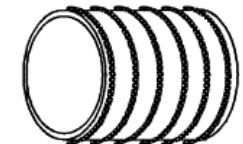


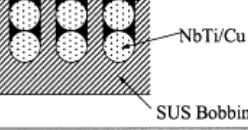
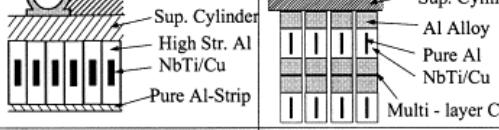
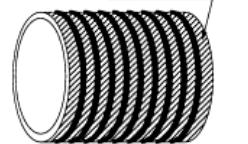
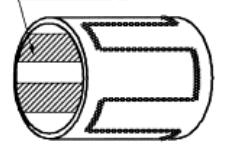
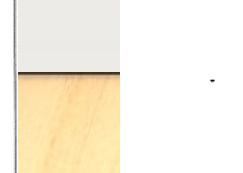
超伝導化されたBENKEI
BENKEI rebuilt as a superconducting analyzing magnet.

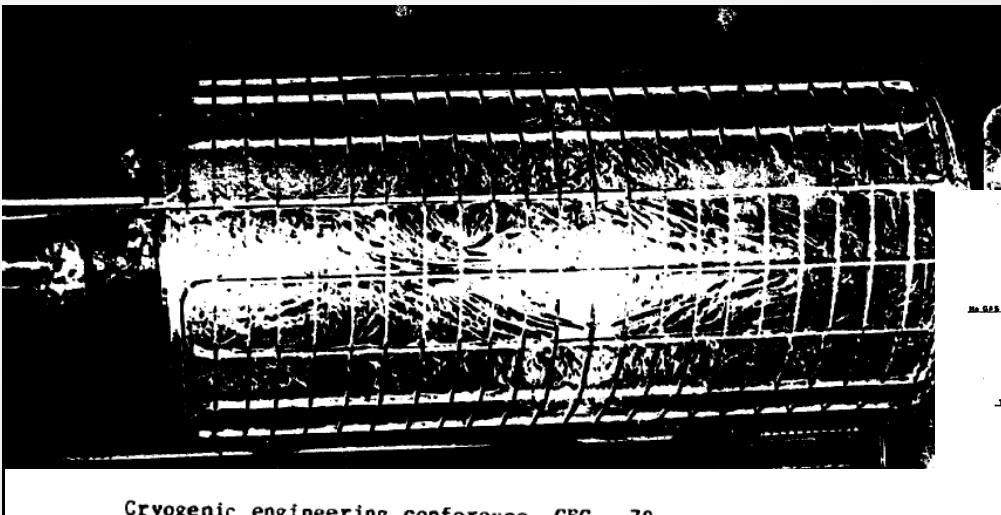
KEK BENKEI

検出器磁石 アルミ安定化超伝導薄肉検出器ソレノイド

- 大型ソレノイドの安定化とクエンチ保護をアルミ安定化で実現し粒子透過性を確保

CELLO	TPC	CDF / TOPAZ / ALEPH / H1
 <p>Cooling Tube Banding NbTi/Cu. Pure Aluminum Mandrel</p>	 <p>Cooling Tube NbTi/Cu 2nd Winding Al Bore</p>	 <p>Cooling Tube Sup. Cylinder NbTi Al</p>
 <p>2φ Flow Indirect Cooling</p>	 <p>2φ Flow</p>	 <p>Thermo - syphon or He Pump</p>

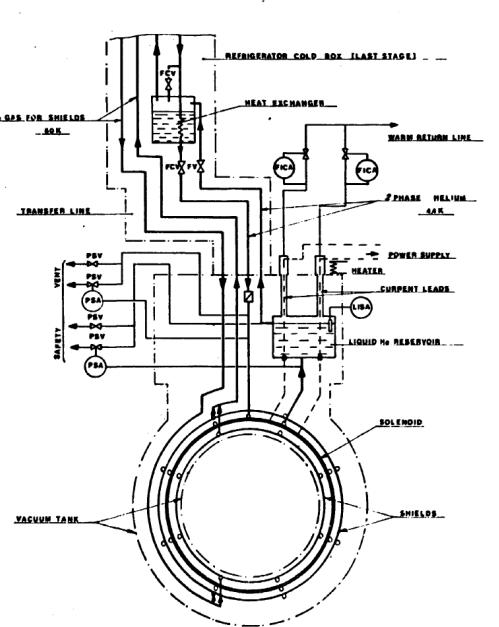
CMD-2	SDC / ATLAS	CMS
 <p>PbSn Solder NbTi/Cu SUS Bobbin</p>	 <p>Cooling Tube Sup. Cylinder High Str. Al NbTi/Cu Pure Al-Strip</p>	 <p>Cooling Tube Sup. Cylinder Al Alloy Pure Al NbTi/Cu</p>
 <p>SUS Bobbin</p>	 <p>Pure Al Strip</p>	



Cryogenic engineering conference. CEC - 79.
- Madison, USA, August 21 - 24, 1979.
CEA - CONF 5014

CONSTRUCTION AND TEST OF THE "CELLO" THIN-WALL SOLENOID

H. Desportes, J. Le Bars and G. Mayaux.
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
DPh/PE-STIPF (France)



検出器磁石 アルミ安定化超伝導薄肉検出器ソレノイド

- CDFソレノイド：日本で最初に作られたアルミ安定化超伝導検出器ソレノイド
 - FNAL TEVATRONで陽子反陽子衝突実験に使われた

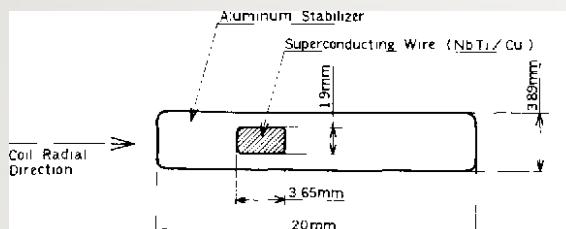


Fig. 3 Schematic diagram of the conductor cross section. The

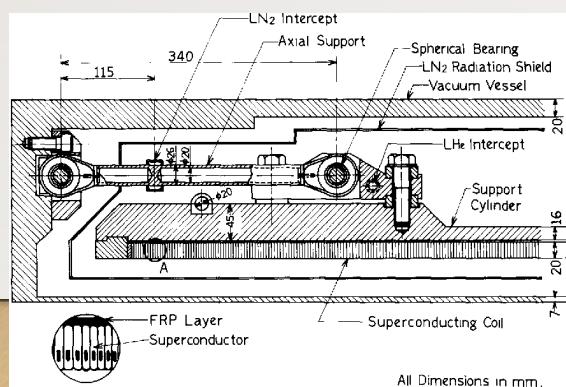


Fig. 2 Schematic drawing of the end section of the CDF solenoid at the shims side. The side

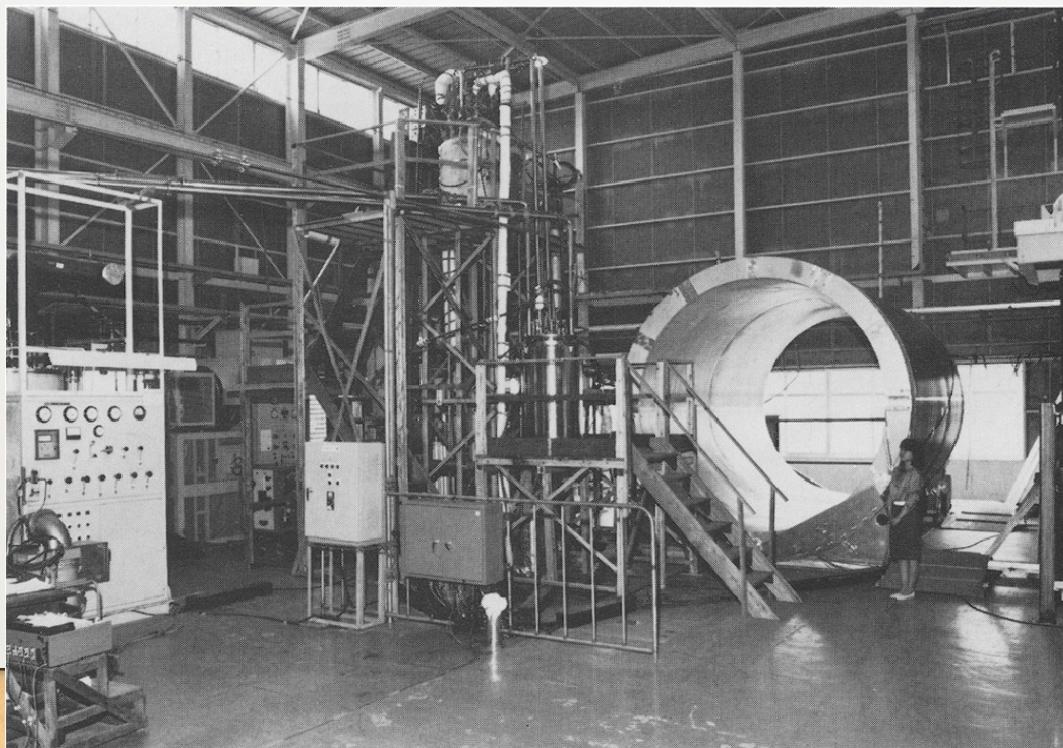


Fig. 1c Picture of the test arrangement of the Utsunomiya Laboratory. The



検出器磁石 アルミ安定化超伝導薄肉検出器ソレノイド

- 日本でのアルミ安定化検出器ソレノイド



TOPAZ検出器ソレノイド



VENUS検出器ソレノイド



BELLE検出器ソレノイド

検出器磁石 アルミ安定化超伝導薄肉検出器ソレノイド

- LHCのアルミ安定化検出器ソレノイド

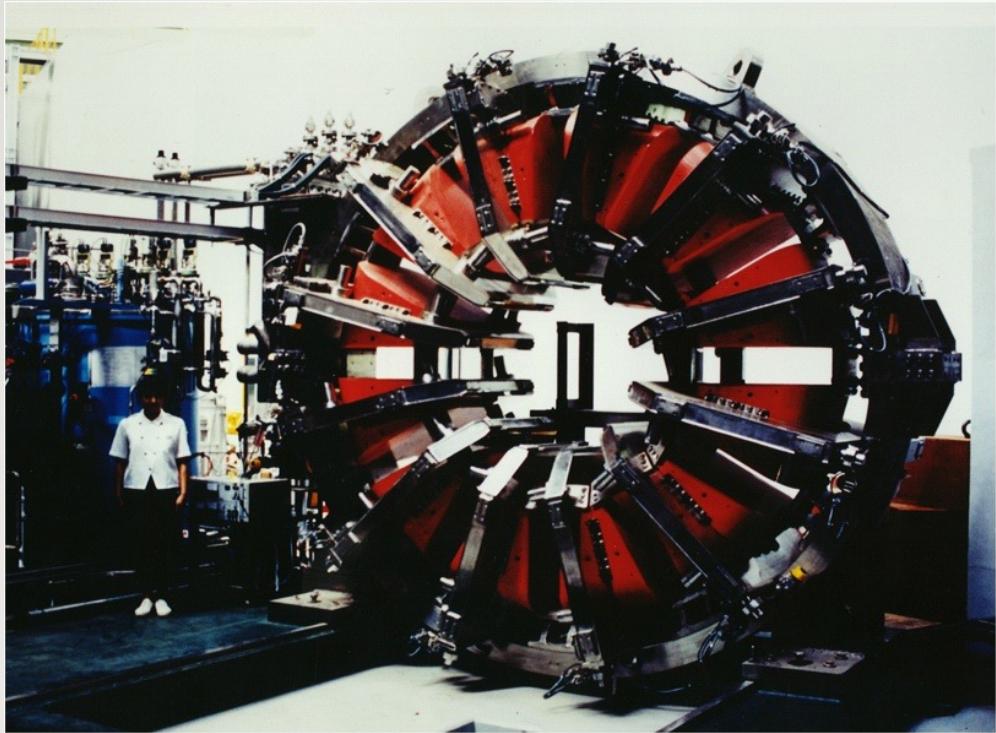


ATLAS検出器ソレノイド

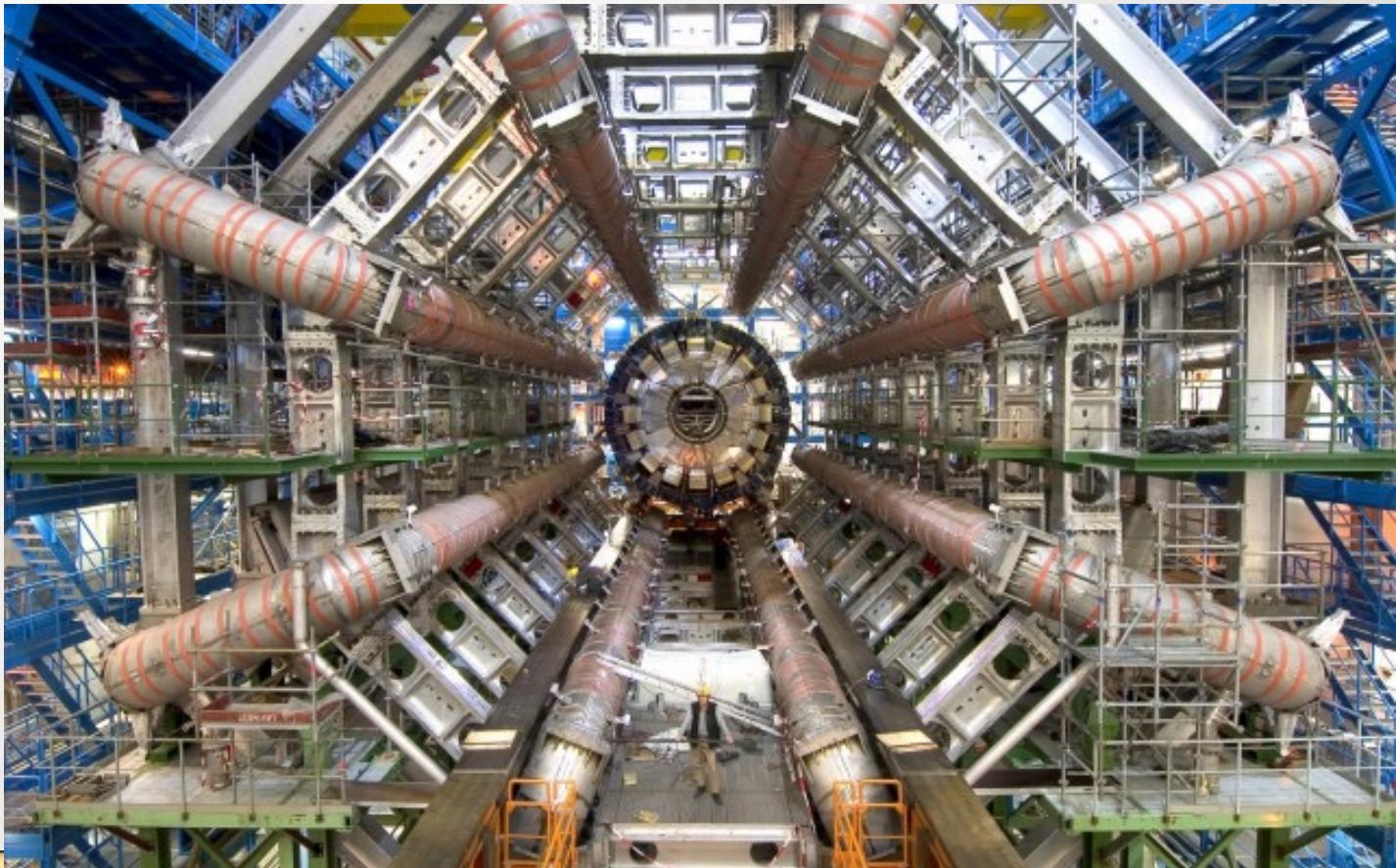


CMS検出器ソレノイド

検出器磁石 トロイド検出器磁石



J-PARC TREC実験
トロイダルスペクトロメーター



LHC ATLAS TROID 検出器磁石（世界最大の超伝導磁石）

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- **将来計画**
- まとめ

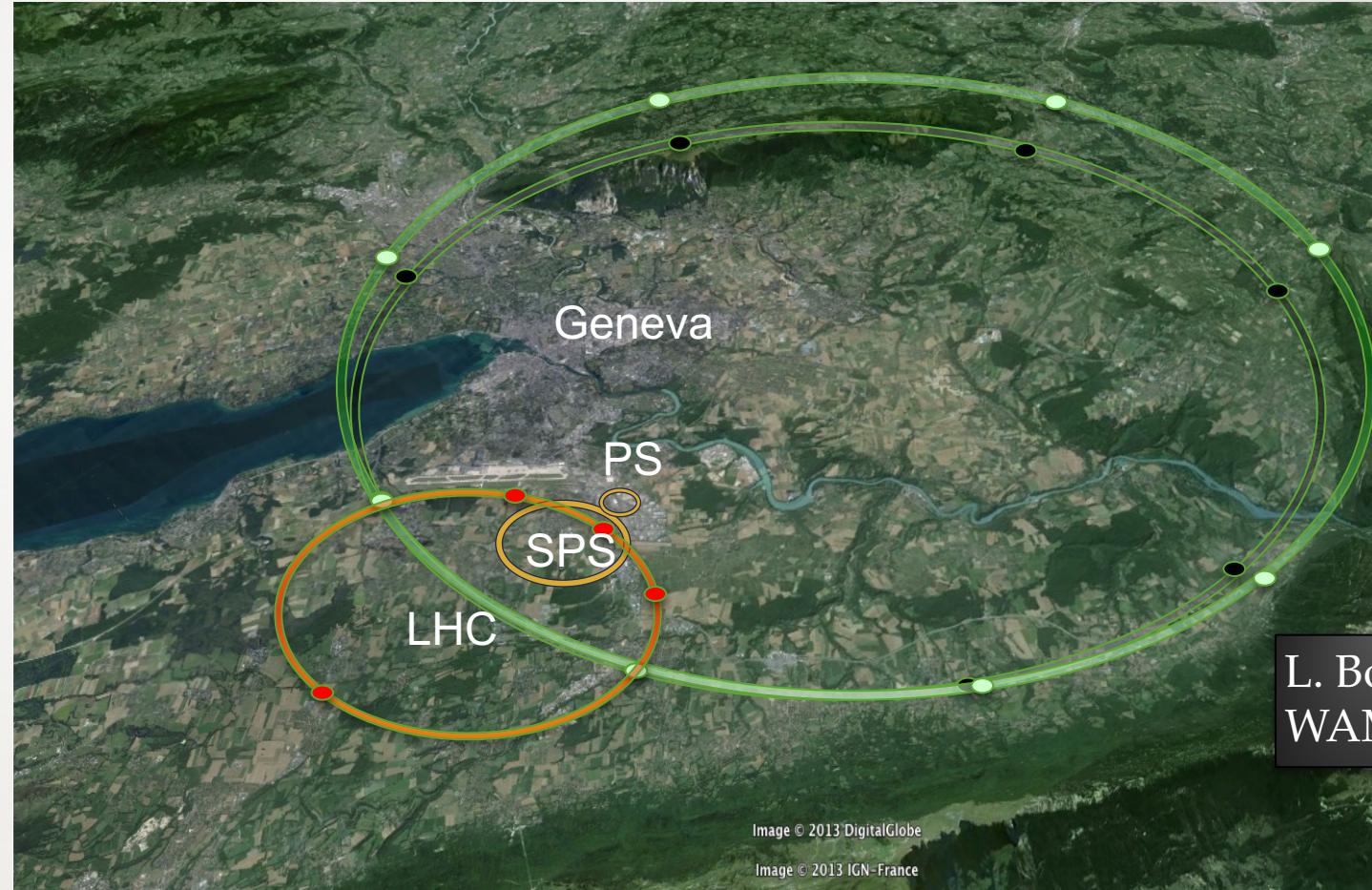
The FCC-hh: a next energy frontier.

将来に向けて FCC

Future Circular Collider (FCC)
 将来の100 TeVマシン
 ジュネーブの周りに
 100km級の加速器を建設

HE-LHC
 (High Energy LHC)
 も今後の物理次第では可能性

どちらも
 20T HTSバージョンと
 16T Nb₃Snバージョン
 が検討されている。



LHC

27 km, 8.33 T
 14 TeV (c.o.m.)

HE-LHC

27 km, 20 T
 33 TeV (c.o.m.)

FCC-hh

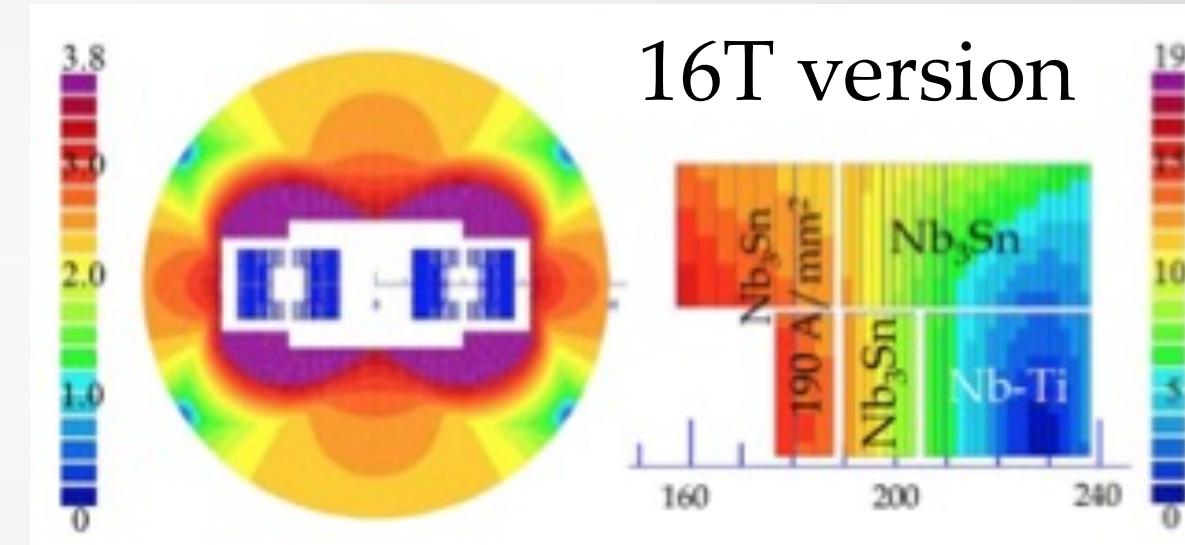
80 km, 20 T
 100 TeV (c.o.m.)

FCC-hh

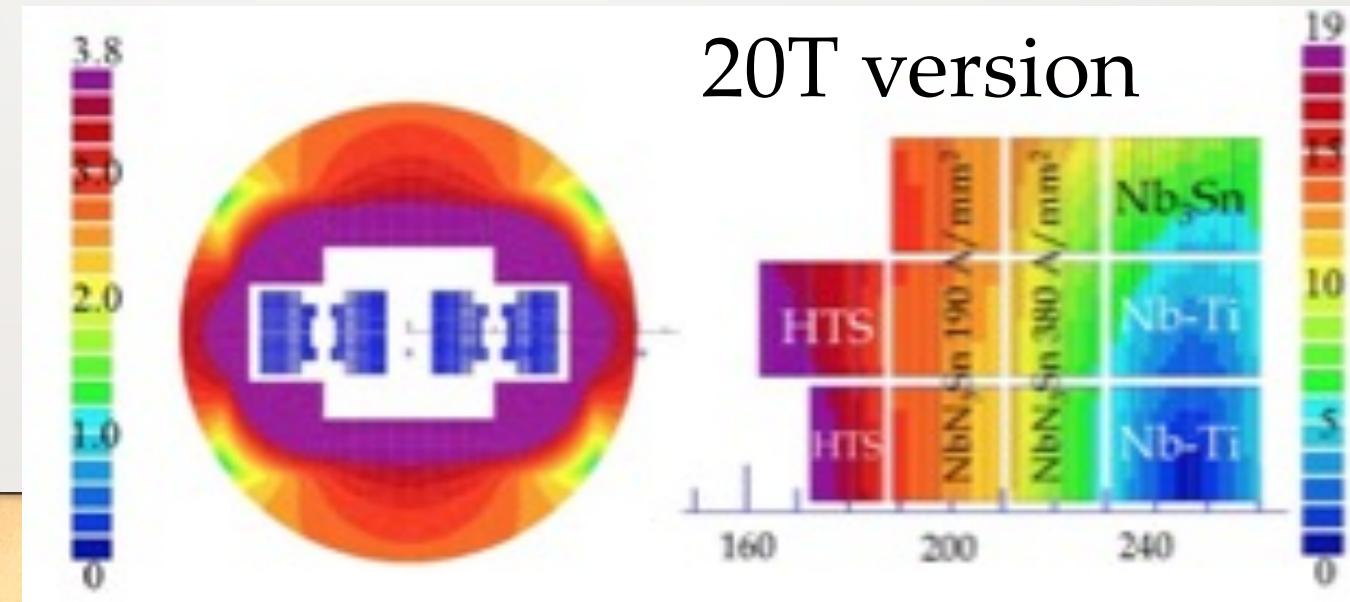
100 km, 16 T
 100 TeV (c.o.m.)

90 | FCC
Magnet Designs

**4300 tons of Nb_3Sn +
10200 tons of Nb-Ti**



**1400 tons of HTS +
6600 tons of Nb_3Sn +
11300 tons of Nb-Ti**

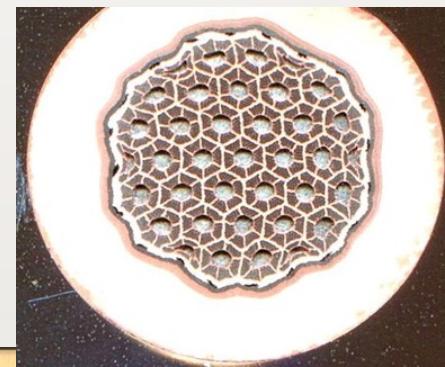
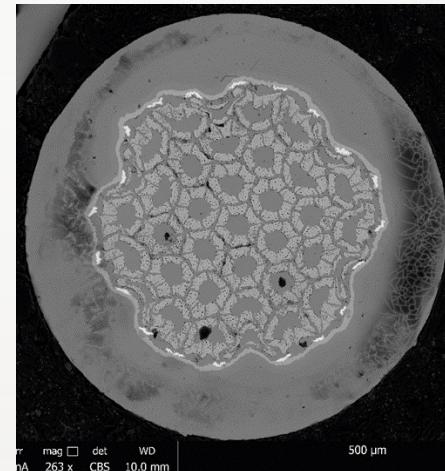
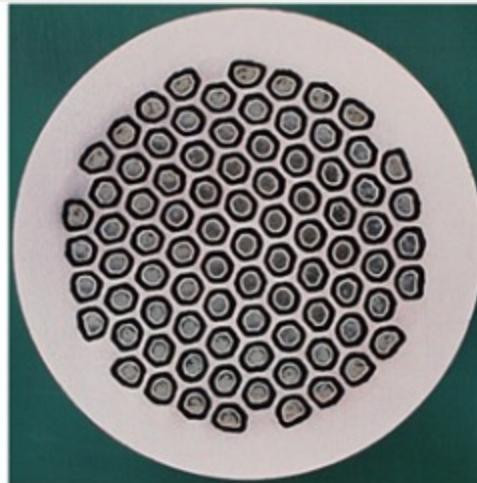
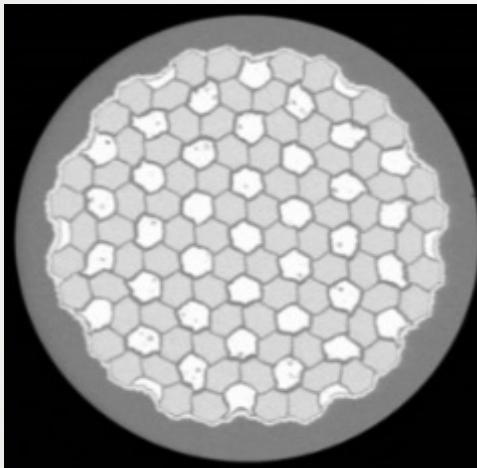


Nb₃Sn線材開発 CERNが中心に世界で共同開発

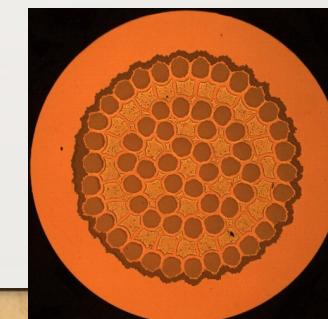
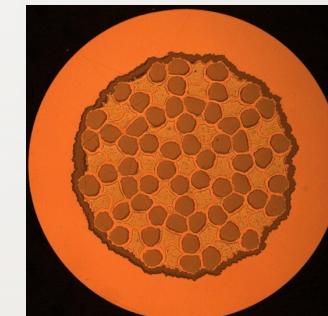
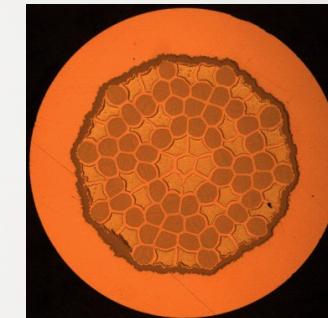
KOBELCO
KOBE STEEL GROUP

JASTEC
SUPERCONDUCTOR

FURUKAWA
ELECTRIC



Kiswire



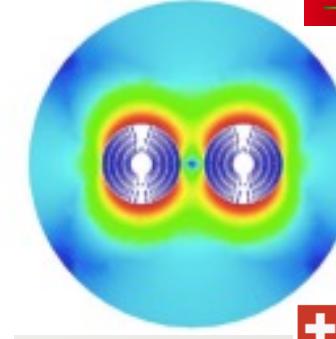
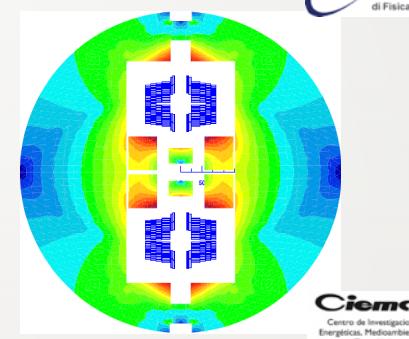
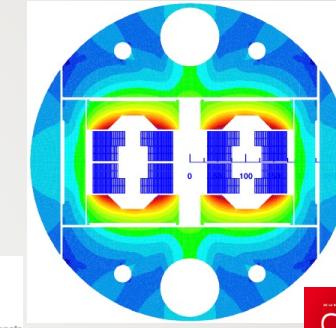
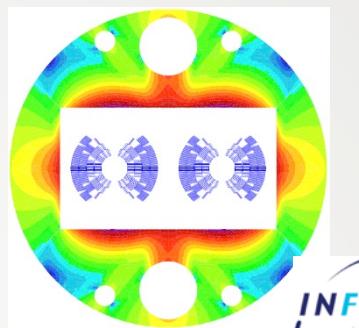
World Wide 16 T Magnet Developments

Programs:



Institutes and companies:

- Bruker, Germany/USA
- Technical University Freiberg, Germany
- Consiglio Nazionale delle Ricerche - SuPerconducting and other INnovative materials and devices institute, Italy
- Lawrence Berkeley National Laboratory, USA
- University of Twente, Netherlands
- INFN Milano, Milano, Italy
- INFN Genova, Genova, Italy
- Tampere University of Technology, Finland
- IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, France
- CIEMAT, Spain
- PSI, Switzerland
- Columbus Superconductor, Italy
- Technical University Vienna, Austria
- University of Geneva, Switzerland
- Fermi National Accelerator Laboratory, USA
- Bochvar Institute, Russia
- TVEL, Russia
- Kiswire (KAT), Corea
- KEK, Japan
- Jastec, Japan
- Fukurawa Electric, Japan



MDP 15 T technological model

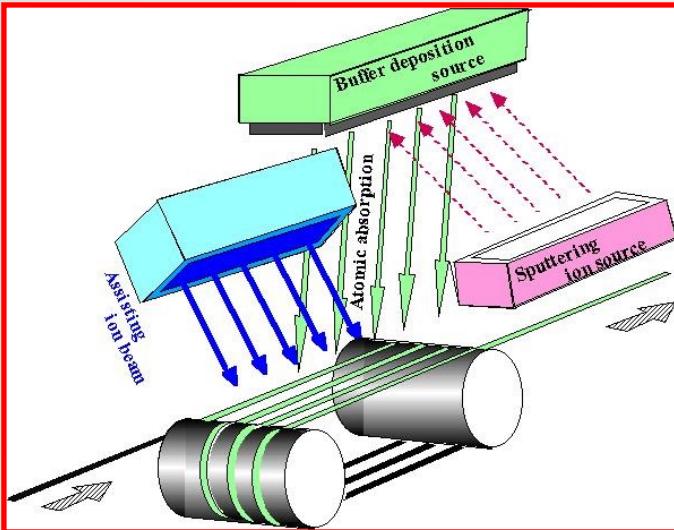


CERN's first ERMC coil is wound

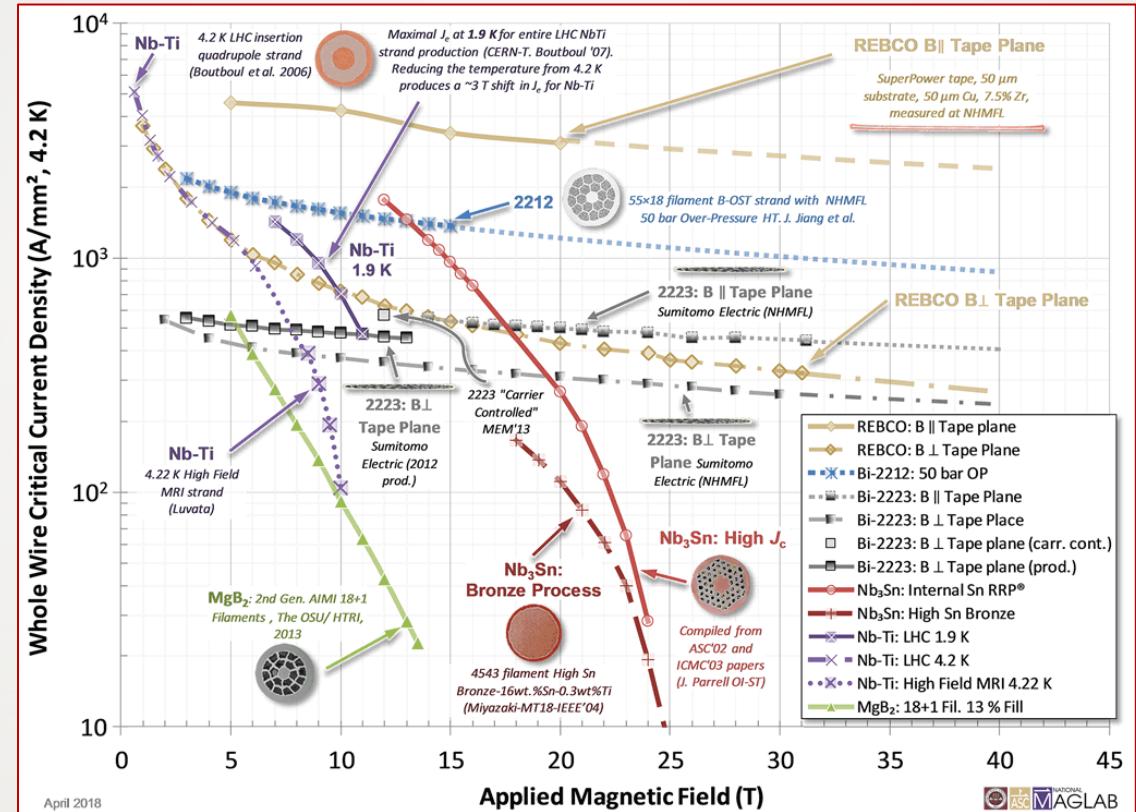


高温 超伝導

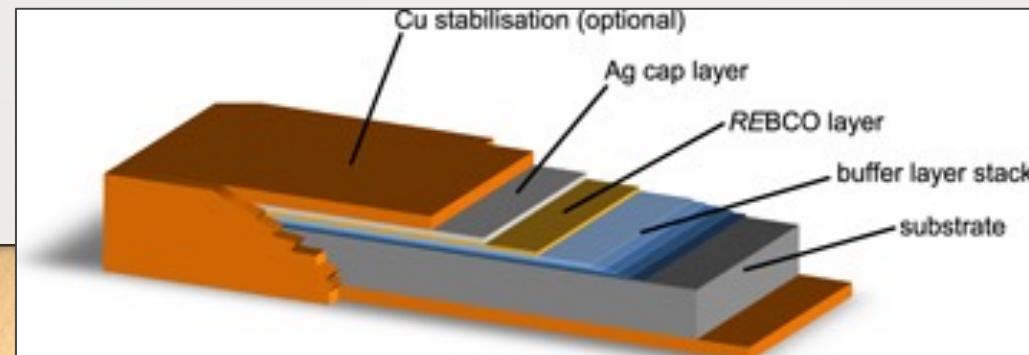
Ion Beam Assisting Deposite (IBAD)



各種超伝導線材の臨界電流密度



ReBCO Coated Conductor

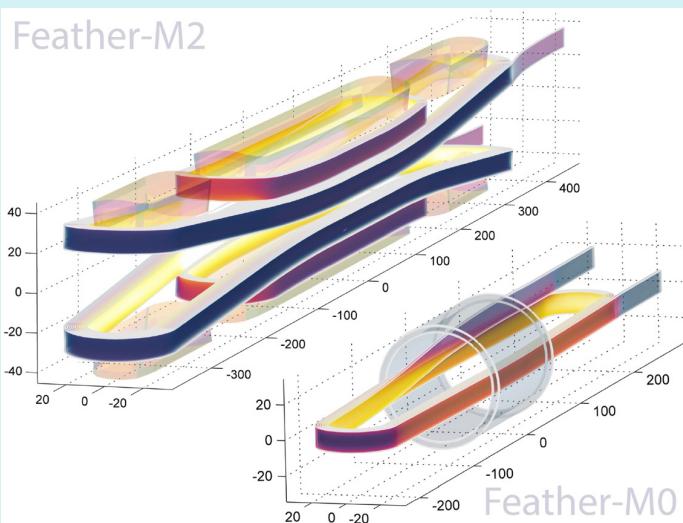


高温超伝導磁石開発

Europe



Feather-M2

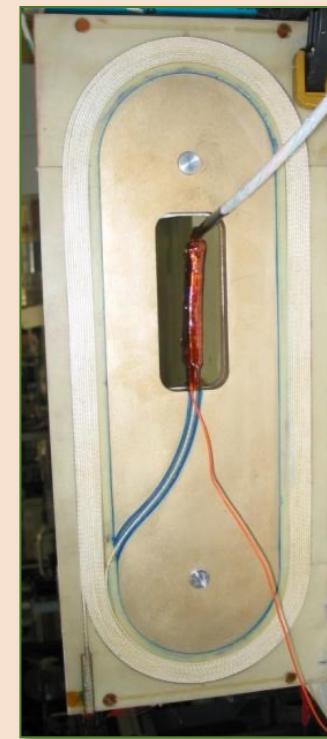
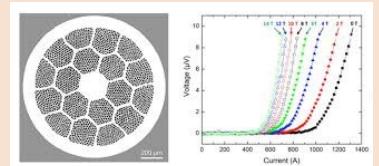


Feather-M0

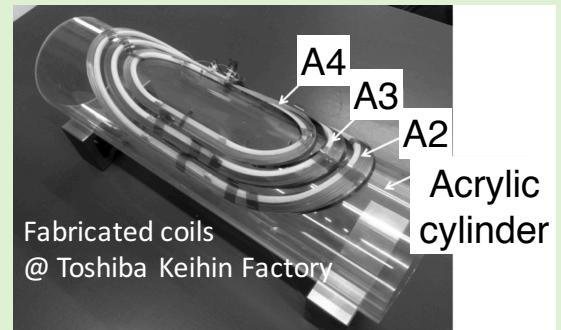
USA



Advanced Conductor Technologies LLC
www.advancedconductor.com

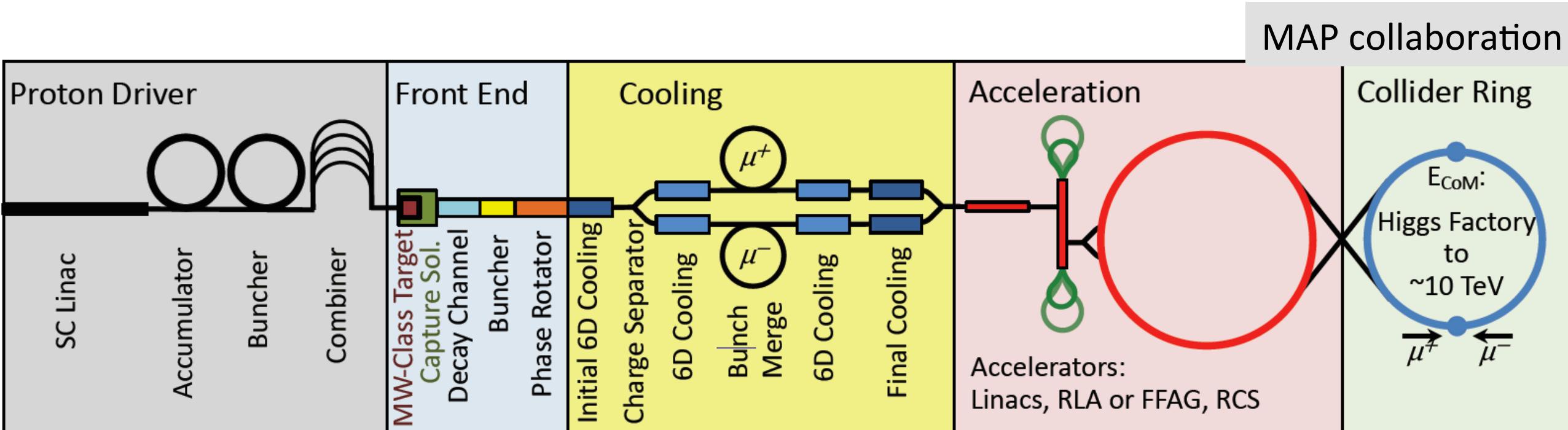


JAPAN



Muon Collider: Magnet Zoo

Muon collider design is driven by finite muon lifetime



Short, intense proton
bunches to produce
hadronic showers

Muon are captured,
bunched and then cooled by
ionisation cooling in matter

Protons produce pions
Pions decay to muons

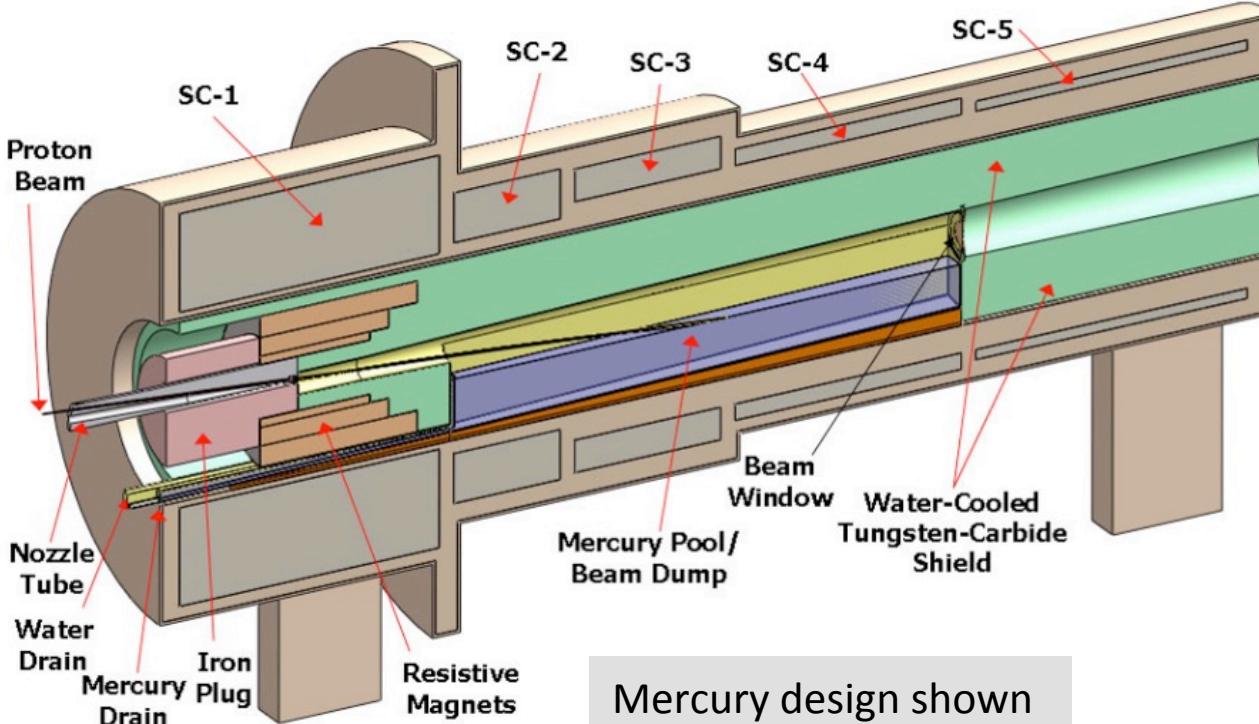
Acceleration to
collision energy

Collision

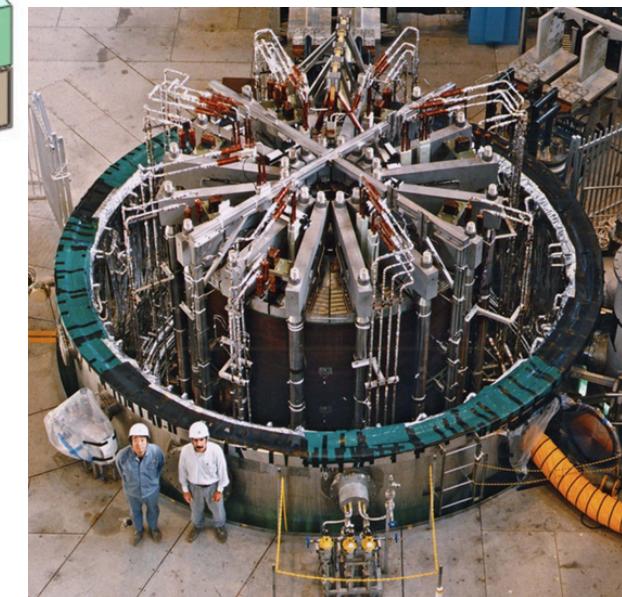
Front End: Muon Production Solenoid large aperture, high field, high radiation

2 MW proton beam target

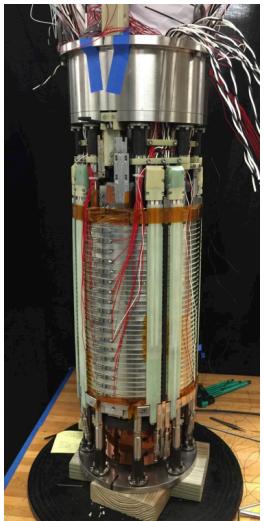
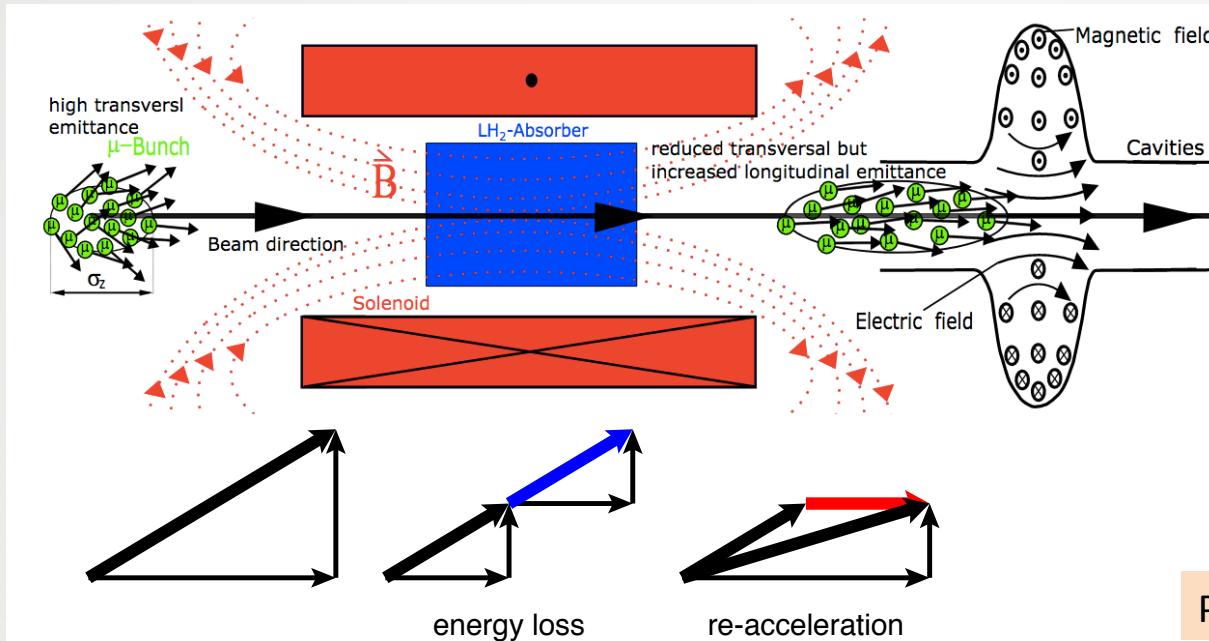
- liquid mercury demonstrated (MERIT) but safety concerns
- experts think graphite target is possible
- alternatives are considered, e.g. fluidized tungsten



ITER Central
Solenoid Model Coil
13 T in 1.7 m (LTS)

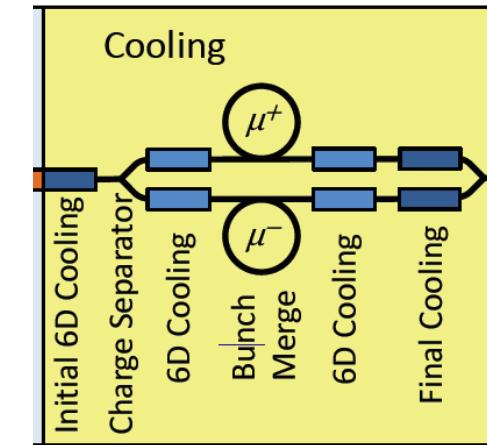


Cooling: Focusing Solenoid: very high field, high radiation



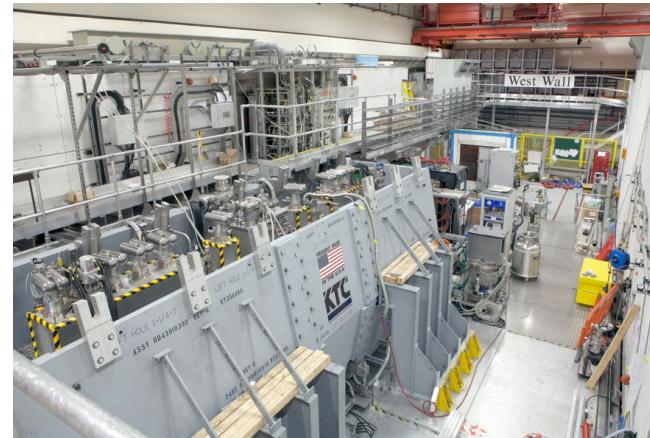
High field solenoids minimise beta-function and impact of multiple scattering
32 T reached
next goal is 40 T
up to 60 T appear possible

NHFML
32 T solenoid
with HTS



Principle has been demonstrated

MICE (UK) Muon cooling principle



Acceleration: RCS or FFA?

Rapid cycling synchrotrons (RCS)

- Combine static and ramping magnets
- **Fast-ramping magnets** to follow beam energy
 - normal conducting or novel HTS
 - $O(kT/s)$ required
- Main challenge is **cost and efficiency of magnets and power converters**
 - $O(95\%)$ energy recovery

RF system

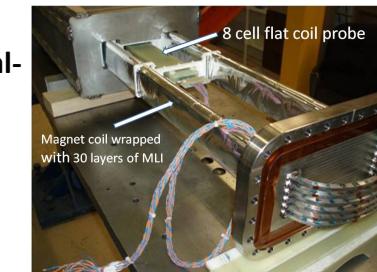
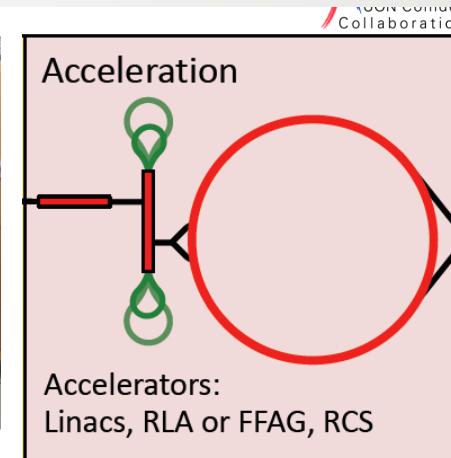
- **Important single-bunch beam loading**
- 2×10^{12} particles in $O(\text{mm})$ -long bunch at 5 TeV

Alternative FFA

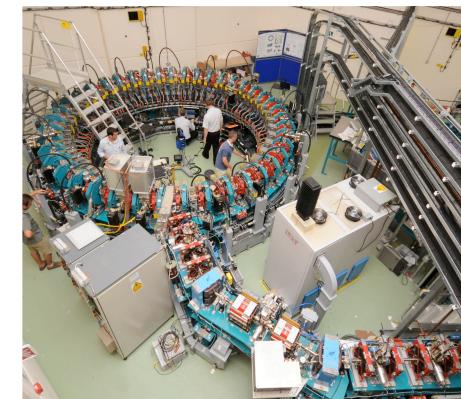
- Fixed (high-field) magnets but large energy acceptance
- Challenging **lattice design** for large bandwidth and limited cost
- **Complex high-field magnets**
- Challenging beam dynamics



FNAL 290 T/s HTS magnet



Test of **fast-ramping normal-conducting magnet** design

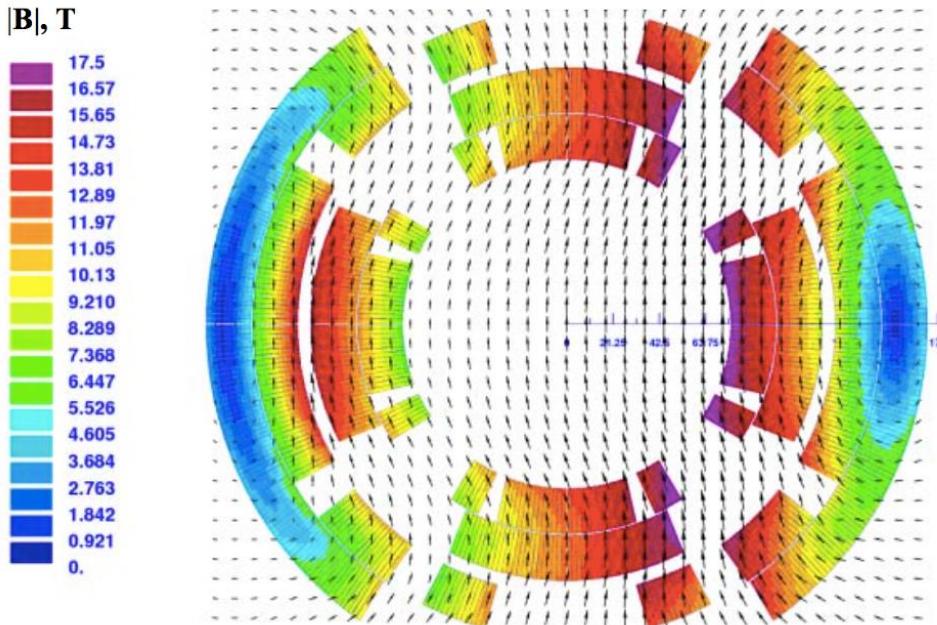


EMMA proof of
FFA principle

Nature Physics 8,
243–247 (2012)

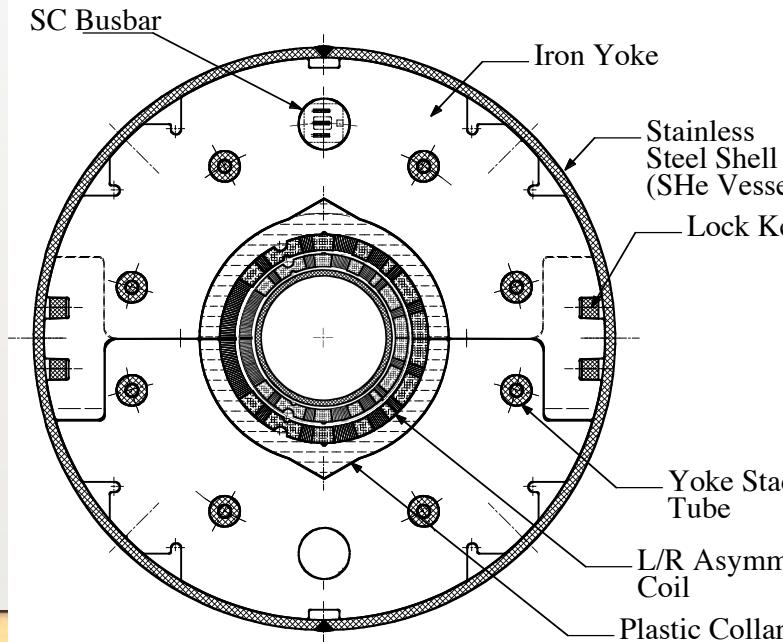
Collider Ring: High Field, High Radiation, Combined Function

Combined function magnet design



V.V. Kashikhin et al.

High Field Version: 2 layer, Nb_3Sn structure needed to be optimized

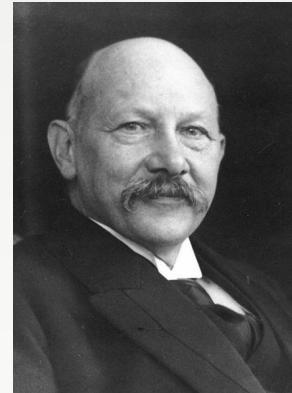


- Conductor: LHC arc outer like Nb_3Sn ?
- Coil: 2 layer L/R asy.
- Coil ID: ~ 140 mm
- Operation Current: ~ 1100 A
- Dipole: ~ 7.5 T
- Quad: ~ 68 T/m
- Peak Field: ~ 12 T

- はじめに
- 超伝導の発見と超伝導電磁石の実現
- 巨大加速器用超伝導磁石の歴史
- ハドロン加速器での応用
- 電子加速器
- 検出器磁石
- 将来計画
- **まとめ**

まとめ

- 加速器と超伝導磁石
- 補完し合うように発展してきた
- NbTiでは限界に達してきている。
- Nb₃Snによる高磁場化
 - FCCに向け世界的な開発
- HTS（高温超伝導）線材
 - 高性能だがまだ非常に高価
 - まずは特殊用途での利用？
 - 高熱負荷（高放射線、高繰り返し）環境
 - 超高磁場（20T以上）
- テクノロジーの転換期 ⇒ 新しいチャンス



Kamerlingh Onnes
超伝導発見



Alvin Tollestrup
TEVATRON磁石開発

Who's next
YOU?

