

超伝導技術が切り拓く 粒子加速器・物理実験のフロンティア

山本 明 (KEK/CERN)

OHO-22, 「夜話」 2022-9-7

アウトライン

- **はじめに**
- **加速器**における応用
 - 超伝導(電)磁石
 - 超伝導高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり

 - **夜話トピックス**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- **未来への夢**

アウトライン

OHO' 22 における講義

- **はじめに**
- **加速器**における応用
 - 超伝導(電)磁石
 - 高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり



超伝導電磁石加速器応用全般	荻津透
超伝導の基礎	有本靖
超伝導電磁石の基礎	鈴木研人
超伝導線材の研究開発	菊池章弘
SuperKEKB 超伝導電磁石システム	大内徳人
HL-LHC 計画と KEK における超伝導磁石開発	中本建志
夜話：超伝導技術が切り拓く粒子加速器・物理実験のフロンティア	山本明
検出器用マグネット	榎田康博
ヘリウム冷凍システム	中西功太
g-2/EDM 超伝導電磁石開発と MRI への精密磁場技術	阿部充志
KAGRA の低温技術	木村誠宏
COMET と耐放射線超伝導磁石開発	吉田誠・飯尾雅実
サイクロトロン超伝導化	奥野広樹
QST 重粒子線治療用加速器の超伝導化	水島康太

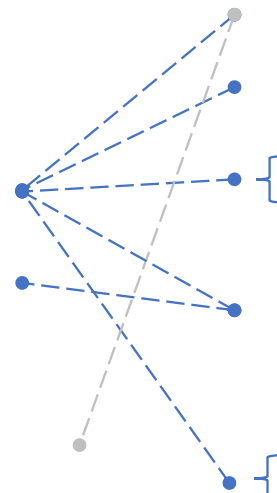
- **夜話トピックス**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」

- **未来への夢**

アウトライン

OHO' 22 における講義

- **はじめに**
- **加速器**における応用
 - 超伝導(電)磁石
 - 高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり



超伝導電磁石加速器応用全般	荻津透
超伝導の基礎	有本靖
超伝導電磁石の基礎	鈴木研人
超伝導線材の研究開発	菊池章弘
SuperKEKB 超伝導電磁石システム	大内徳人
HL-LHC 計画と KEK における超伝導磁石開発	中本建志
夜話：超伝導技術が切り拓く粒子加速器・物理実験のフロンティア	山本明
検出器用マグネット	榎田康博
ヘリウム冷凍システム	中西功太
g-2/EDM 超伝導電磁石開発と MRI への精密磁場技術	阿部充志
KAGRA の低温技術	木村誠宏
COMET と耐放射線超伝導磁石開発	吉田誠・飯尾雅実
サイクロトロン超伝導化	奥野広樹
QST 重粒子線治療用加速器の超伝導化	水島康太

- **夜話トピックス**—宇宙観測への超伝導技術応用:

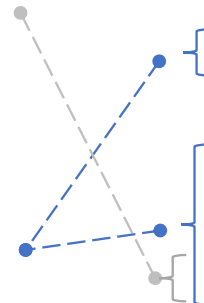
- 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」

- **未来への夢**

アウトライン

OHO' 22 における講義

- **はじめに**
- **加速器**における応用
 - 超伝導(電)磁石
 - 高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり



超伝導電磁石加速器応用全般	荻津透
超伝導の基礎	有本靖
超伝導電磁石の基礎	鈴木研人
超伝導線材の研究開発	菊池章弘
SuperKEKB 超伝導電磁石システム	大内徳人
HL-LHC 計画と KEK における超伝導磁石開発	中本建志
夜話：超伝導技術が切り拓く粒子加速器・物理実験のフロンティア	山本明
検出器用マグネット	榎田康博
ヘリウム冷凍システム	中西功太
g-2/EDM 超伝導電磁石開発と MRI への精密磁場技術	阿部充志
KAGRA の低温技術	木村誠宏
COMET と耐放射線超伝導磁石開発	吉田誠・飯尾雅実
サイクロトロン超伝導化	奥野広樹
QST 重粒子線治療用加速器の超伝導化	水島康太

- **夜話トピックス**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」

- **未来への夢**



感謝

加速器科学・素粒子実験推進への 超伝導技術開発の先駆者



■ 平林洋美先生
(~ 2008)



年	KEK:超伝導技術による達成
1983 ~	KEK-PS ビームライン(平林) スペクトロメータ磁石
1986 ~	KEK-TRISTAN 加速空洞(小島) ビーム収束磁石、粒子検出器磁石
1999 ~	KEK-B B factory 空洞、磁石
2008 ~	LHC ビーム収束磁石、粒子検出器磁石 HL-LHC 偏向磁石
2009 ~	J-PARC ビームライン磁石
2010 ~	KEK Compact Energy Recovery Linac STF SC Linac (for preparing ILC)

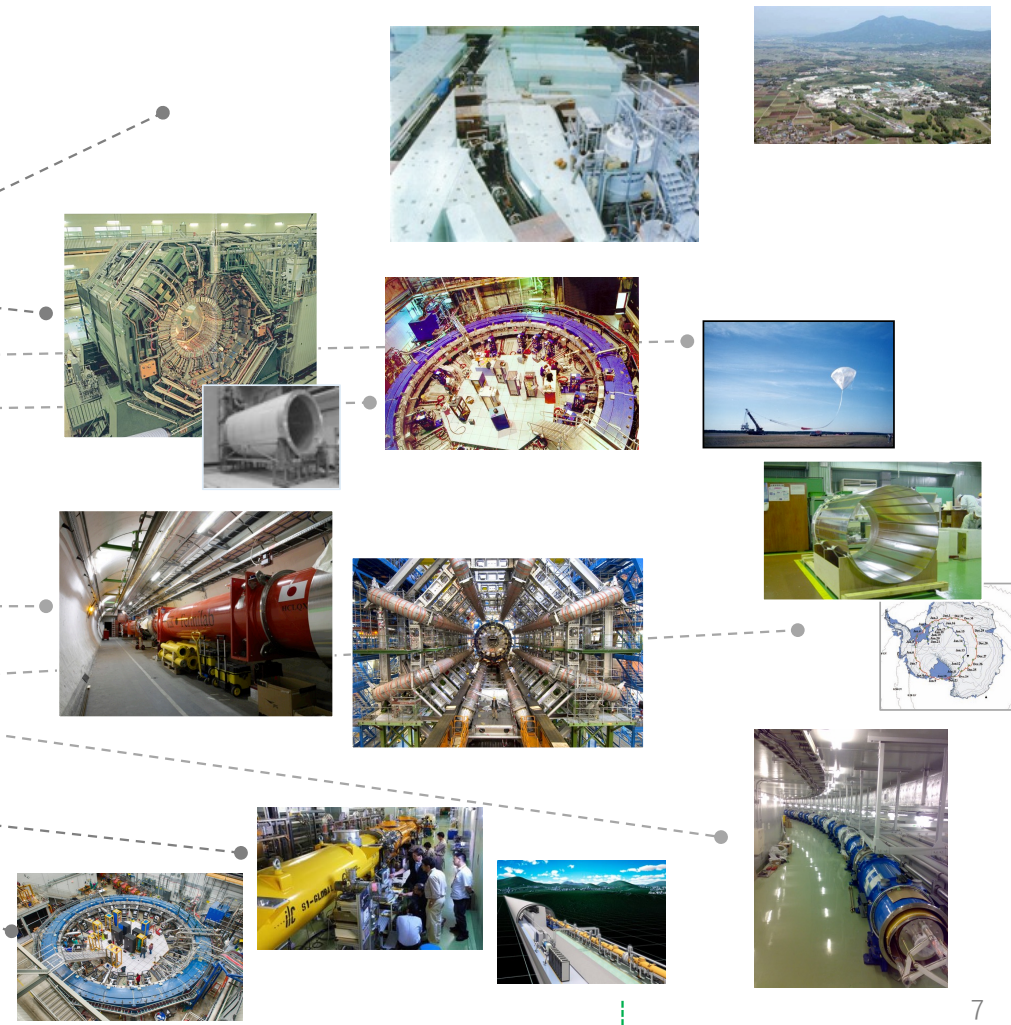


■ 小島融三先生
(~ 2008)



私自身の「加速器・物理実験への超伝導技術応用」の取り組み

Year	Project	Hosted by
1980s	KEK-PS SC (π 1) beamline TOPAZ solenoid for TRISTAN	KEK KEK
1990s	BESS solenoid ballooning in Canada Muon g-2 storage ring WASA solenoid Belle detector solenoid (assist) MEG solenoid	NASA/ISAS BNL Uppsala KEK Tokyo/PSI
2000s	LHC-IRQ , accelerator LHC-ATLAS detector solenoid BESS-Polar balloon in Antarctica SC p-beamline for T2K v-beam (assist)	CERN CERN NASA/ISAS J-PARC
2010s	SRF R&D & STF linac (S1-Global) ILC Global Design Effort Muon g-2 ring, moved and revived	KEK ILC/GDE Fermilab

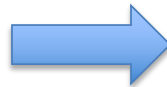
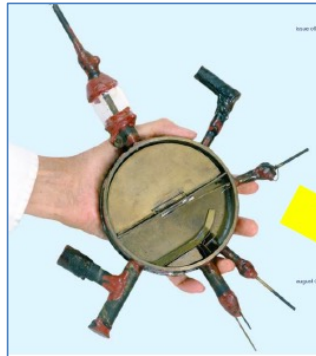


Advances in Particle Accelerators based on SC Technology

超伝導技術を基盤とした粒子加速器の飛躍的發展:LHC

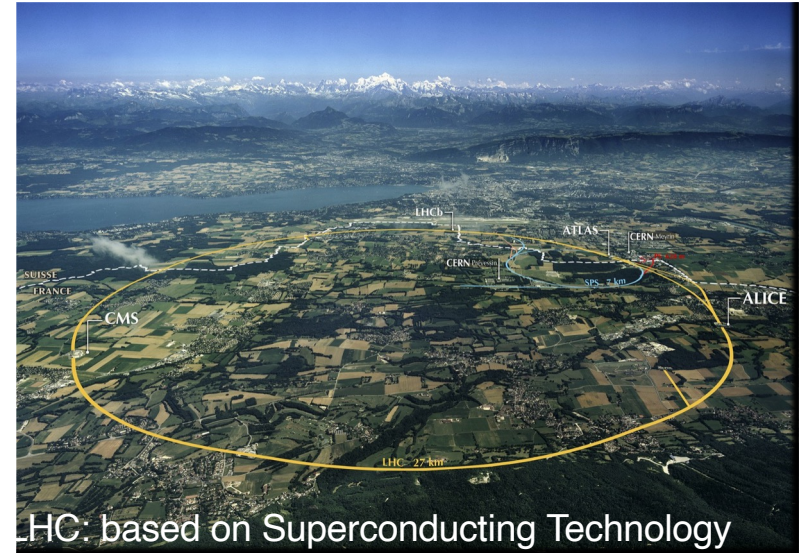
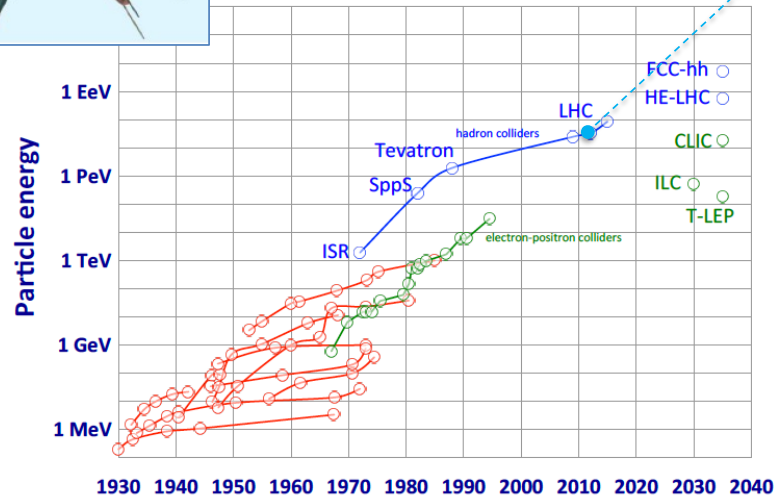


Lawrence



1932: 1st Cyclotron (LBL)

- Diam. 0.13 m,
- Energy 80 keV



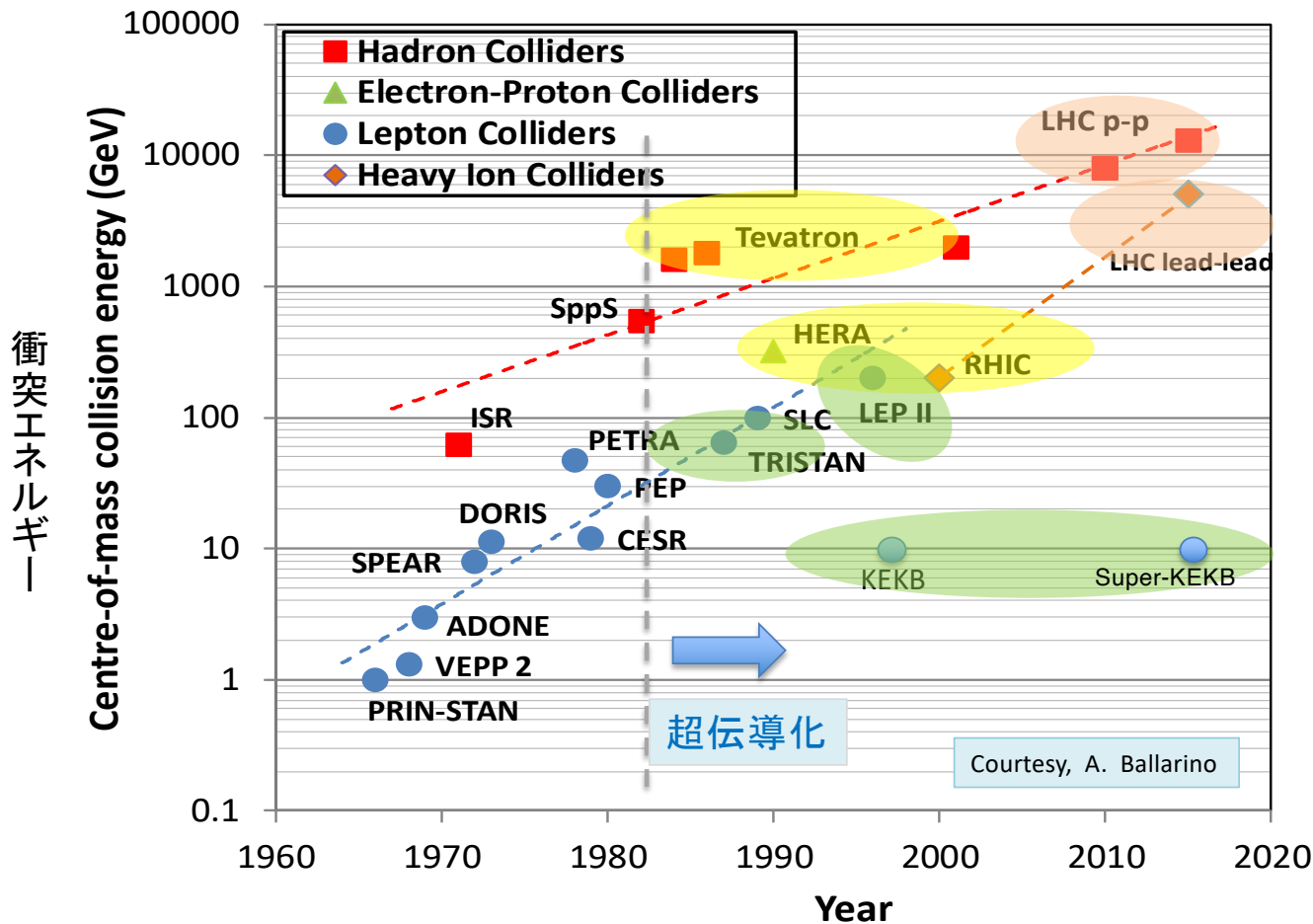
LHC: based on Superconducting Technology

2008; Large Hadron Collider (CERN)

- Diam. 9km,
- Energy: 7 → 14 TeV
- Factor: $9 \text{ km} / 0.13 \text{ m} : > 6.9 \times 10^4$
 $14 \text{ TeV} / 80 \text{ keV} : > 1.8 \times 10^8$

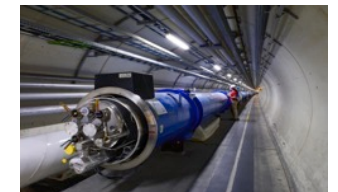
Circular/Linear Collider Accelerators realized

円形・直線衝突型粒子加速器の進展



Colliders with SC Magnet & RF

Colliders w/ SC magnets (超伝導磁石)



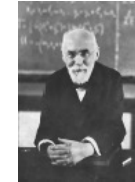
Colliders w/ SRF system (超伝導高周波)



Particle Accelerators based on Lorentz Force

電磁気力 (Lorentz Force) を基盤とする粒子加速器

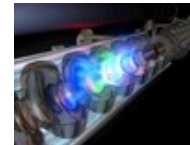
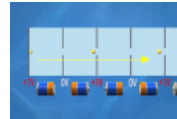
- Principle of circular accelerators:
 - Particles accelerated n the same circular orbit, multiple times, according to **Lorentz Force**: $F = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$
 - Particles accelerated \rightarrow momentum, \mathbf{P} , increased
 \rightarrow magnetic field increased (“**synchro**”) to keep the particles on the same orbit of curvature ρ

H.A. Lorentz
(1853-1928)

- **Electro field** accelerates particles

電場で直線加速

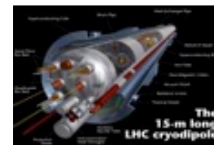
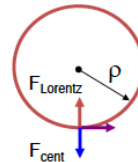
$$\mathbf{F} = e \mathbf{E}$$



- **Magnetic field steers** the particles in a \sim circular orbit

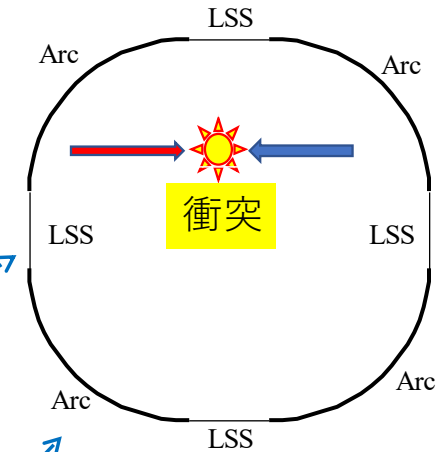
磁場で軌道制御

$$\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

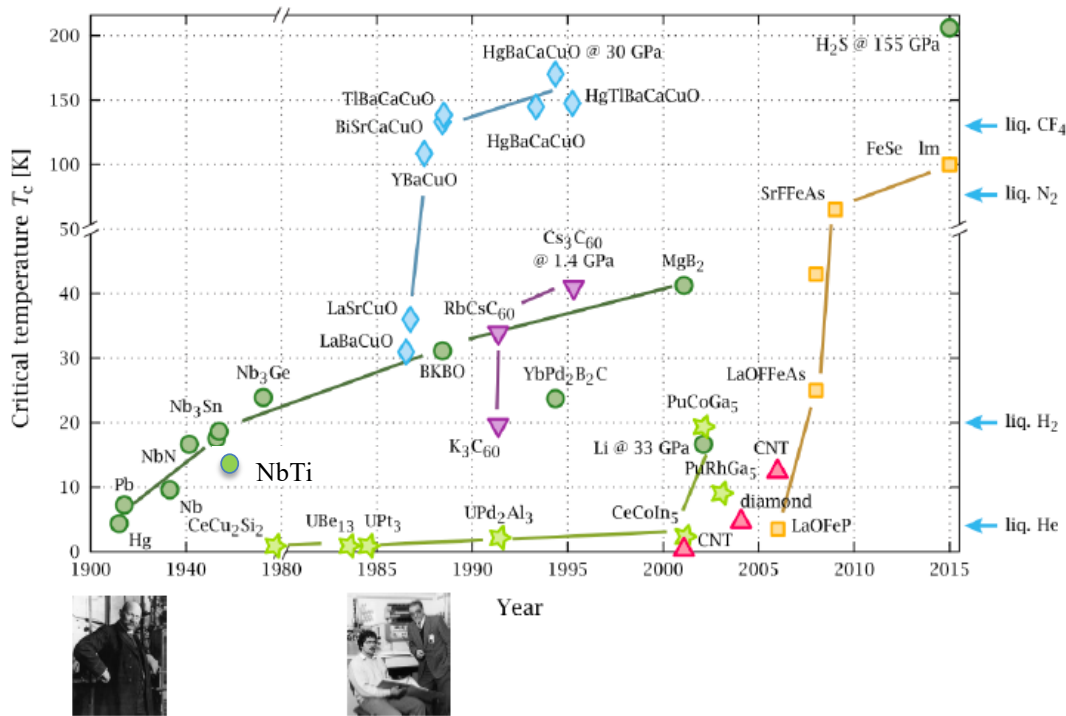


$$p = eB\rho$$

Constant



超伝導材の進展



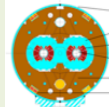
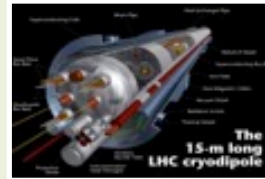
Material	T_c [K]	$B_c(0)$ [T]	$B_{c1}(0)$ [T]	$B_{sh}(0)$ [T]	$B_{c2}(0)$ [T]
Nb	9.2	(0.25)	0.18	0.21	0.28
NbTi	9.2 ~ 9.5	--	0.067	--	11.5 ~ 14
Nb₃Sn	18.3	(0.54)	(0.05)	0.43	28 ~ 30
MgB ₂	39	(0.43)	(0.03)	0.31	39
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (REBCO family)	92		0.01		100
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₁ Cu ₂ O ₈ (BSCCO-2212)	94		0.025		>100/30
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (BSCCO-2223)	110		0.0135		>100/30
Application				RF	Magnet

Superconducting Phases and Applications

超伝導状態に応じた応用

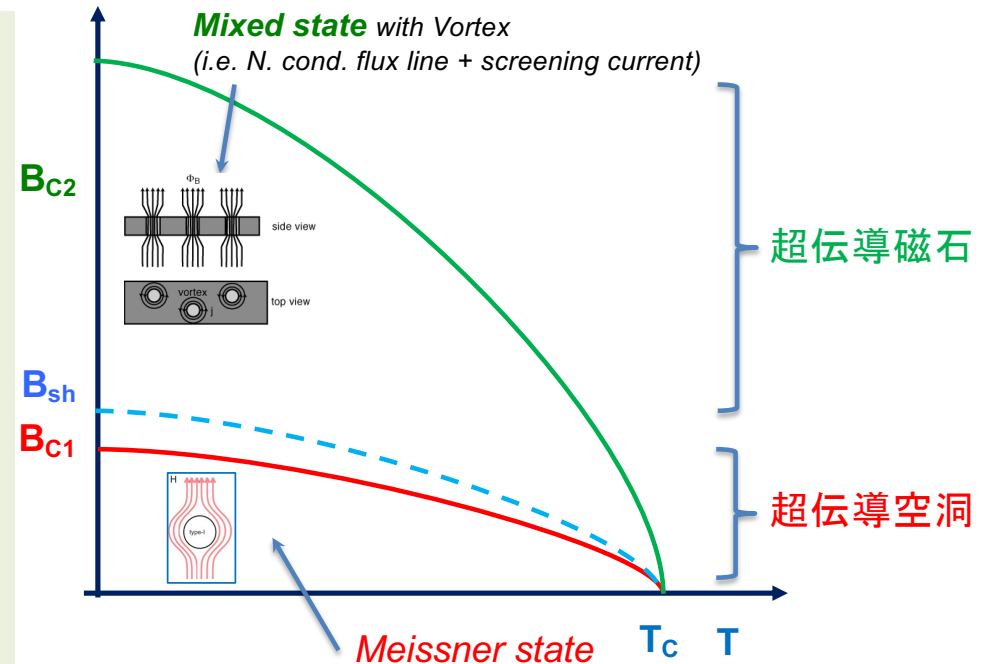
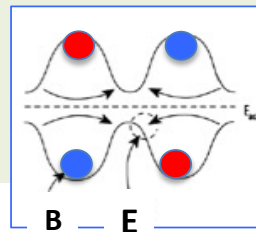
- **SC Magnet → Mixed stateby** (混合域)

- Bc2 : reaching high field
 - NbTi (Bc2, Tc) : 11.5 T, 9.5 K
 - Nb₃Sn (Bc2, Tc) : 21.5 T, 18 K

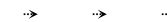


- **SC RF → Meissner state+** (純超伝導域+)

- B_{sh} : Limit Meissner +
 - Nb (B_{sh}) : 210 mT
 - Nb₃Sn (B_{sh}) : 430 mT



Screening current over λ , no mag. field deeper



アウトライン

- はじめに
- **加速器**における応用
 - 超伝導(電)**磁石**・
 - 超伝導高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり
 -
 - **夜話ピックアップ**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- **未来への夢**

Progress in SC Magnets for Collider Accelerators

超伝導(磁石)加速器の発展



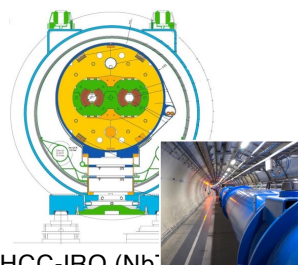
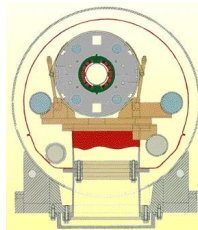
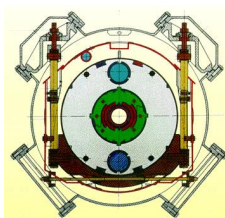
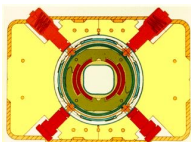
Tevatron-D.

HERA-D.

RHIC-D.

LHC.D (NbTi)

Main Dipole



Not in scale

ISR-IRQ

TRISTAN/KEKB-IRQ

LHCC-IRQ (NbTi)

IR Quad.

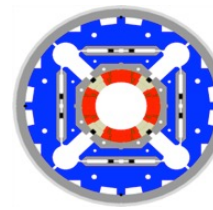
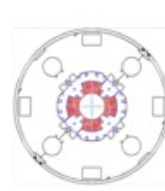
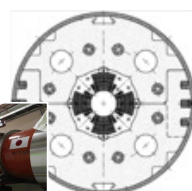
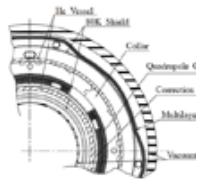
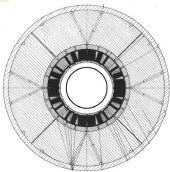


図 6. J-PARC-T2K ν 振動実験・超伝導一次陽子ビームライン。

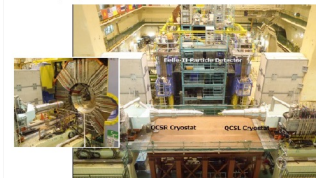
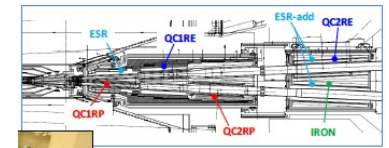
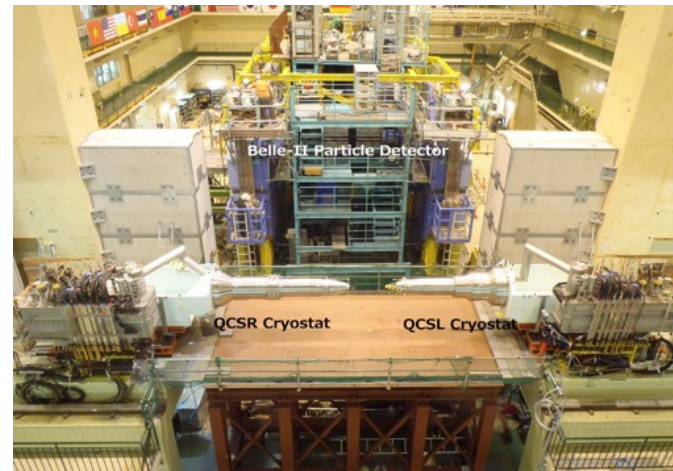
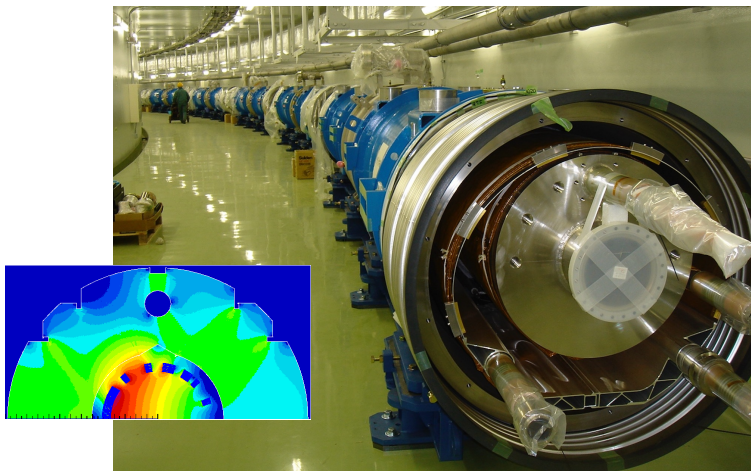


図 7. SuperKEKB ビーム衝突点最終収束超伝導磁石システムの Belle 粒子検出器への組み込み。



KEK 加速器における 超伝導磁石応用の進展(例)



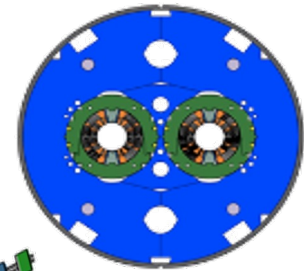
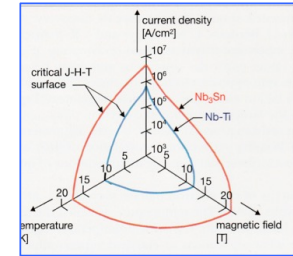
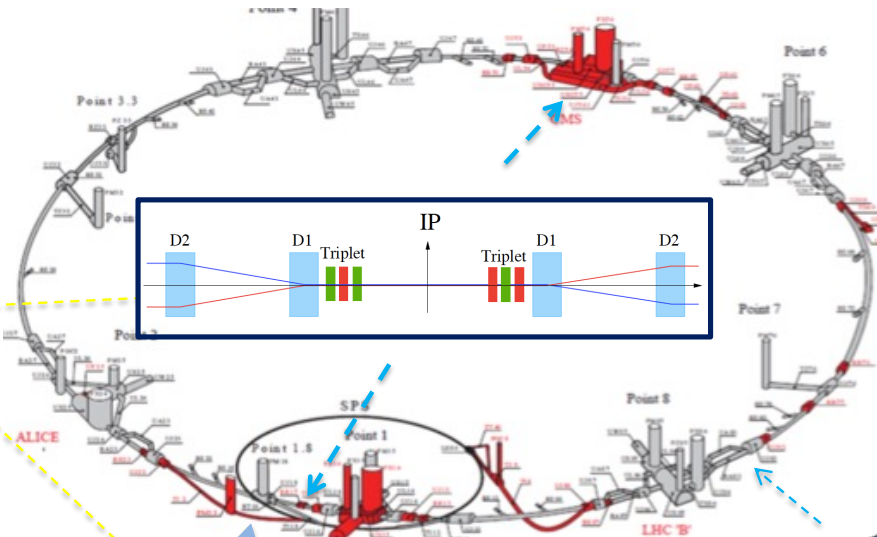
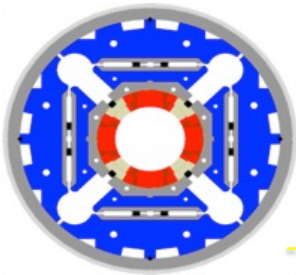
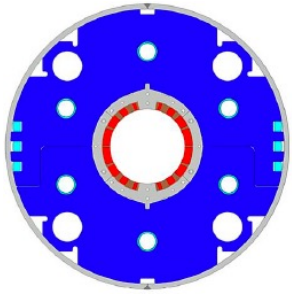
日本加速器学会・
技術貢献賞
大内徳人さん(2022年)

日本加速器学会・技術貢献賞
荻津透・中本建志、東憲男さん(2008年)



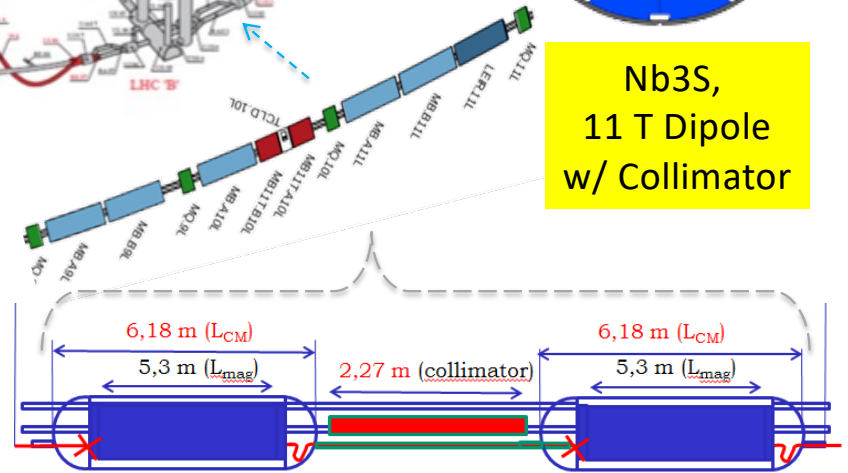
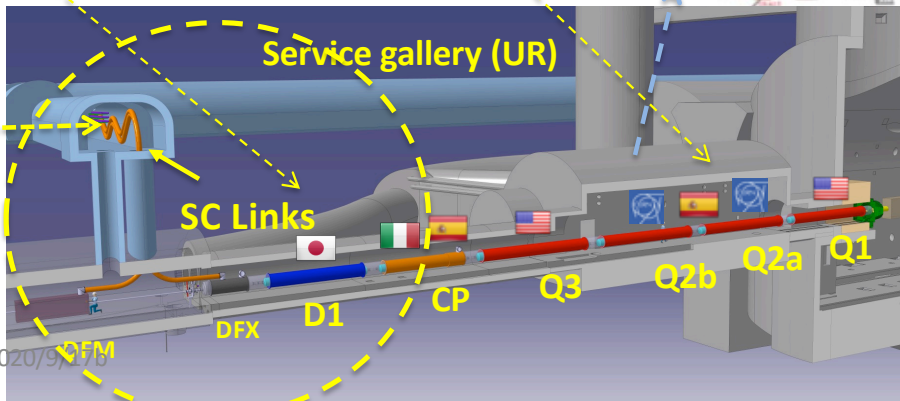
CERN-HL-LHC, Nb3Sn 超伝導磁石, MgB2 超伝導送電

IR Quad. (MQXF):
Nb3Sn,
IR Dipole (D1):
NbTi



Nb3S,
11 T Dipole
w/ Collimator

Superconducting
Link;
MgB₂

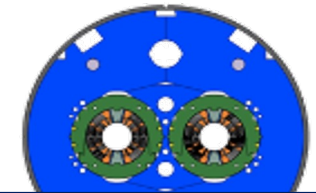
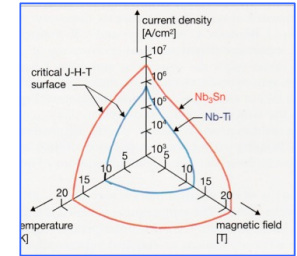
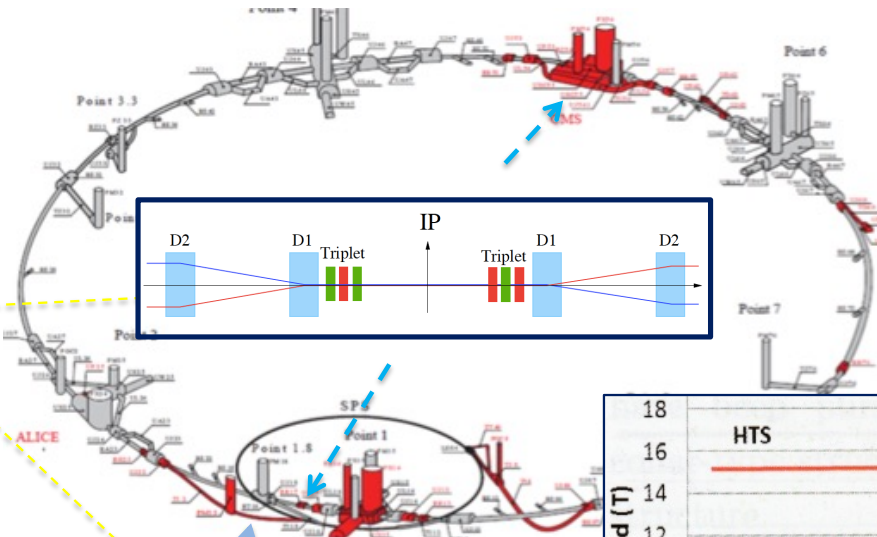
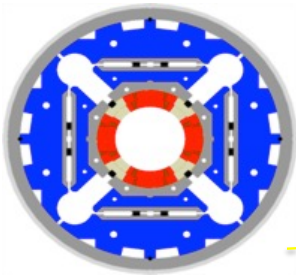
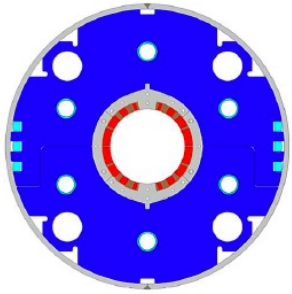


A. Yamamoto, 2020/9/27

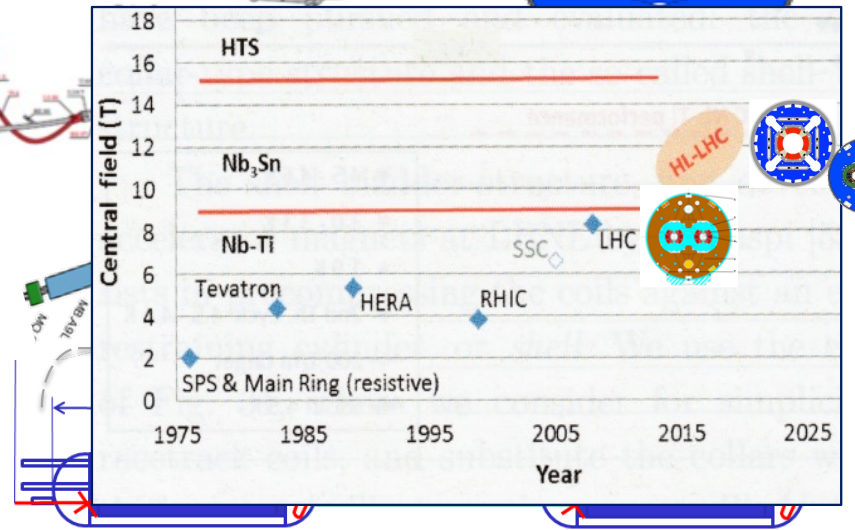
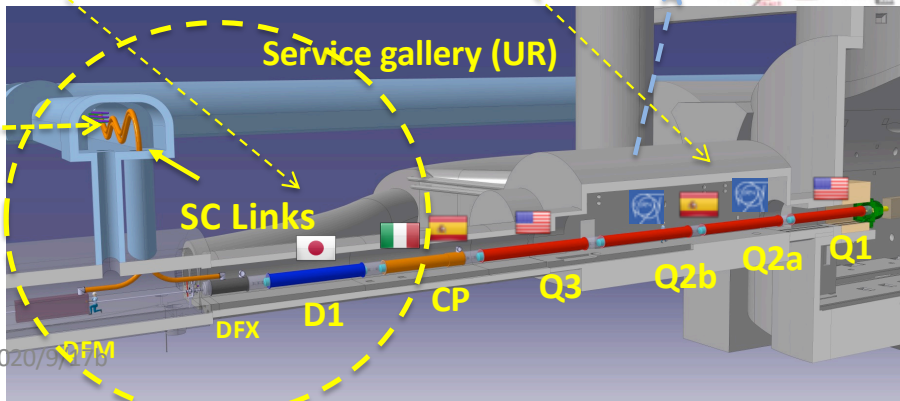
CERN-HL-LHC, Nb₃Sn 超伝導磁石, MgB₂ 超伝導送電



IR Quad. (MQXF):
Nb₃Sn,
IR Dipole (D1):
NbTi



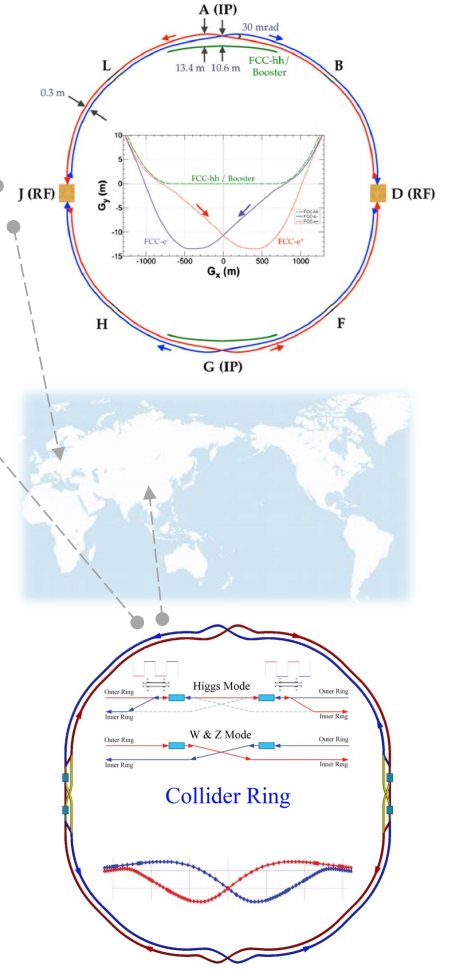
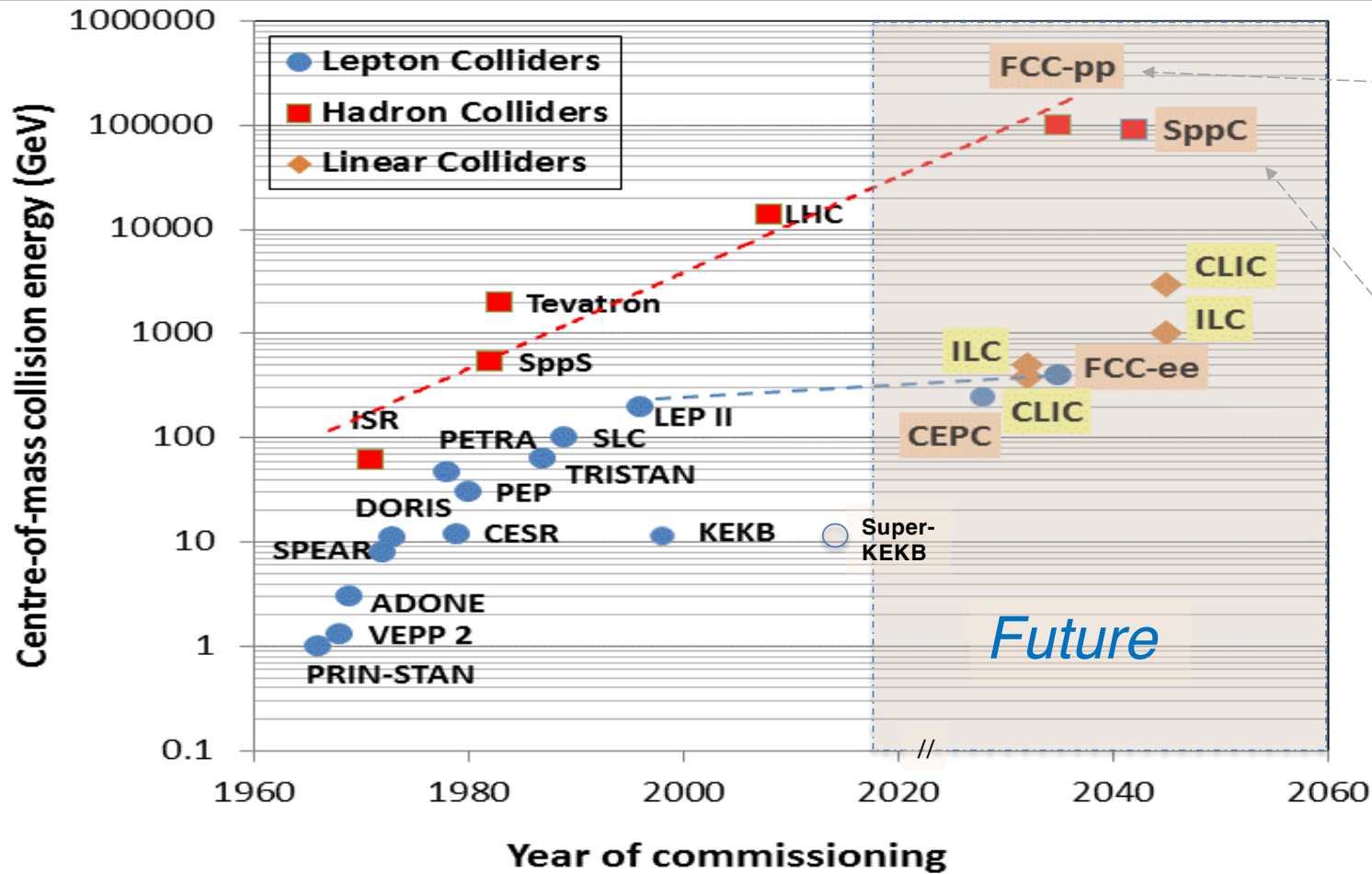
Superconducting Link;
MgB₂



A. Yamamoto, 2020/9/27

Future Energy-Frontier Colliders expected

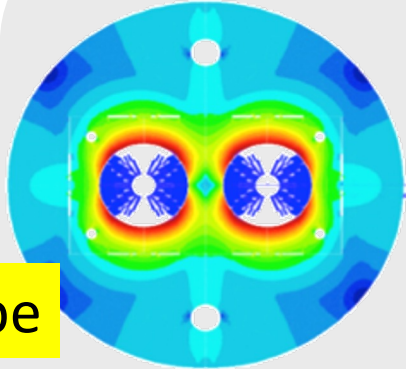
粒子加速器の将来計画



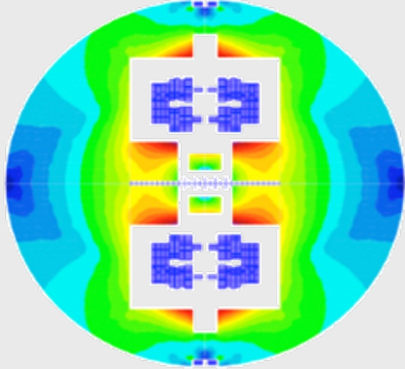
Multiple R&D Approaches for 16 T Dipole in Europe and US

Europe

Cos- θ



Common coils



Blocks

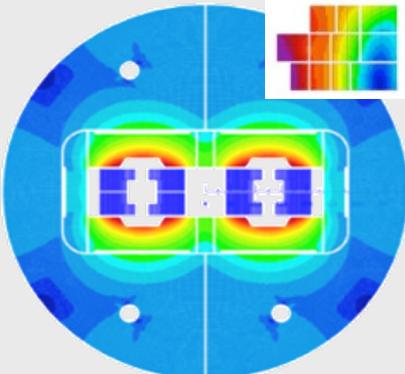
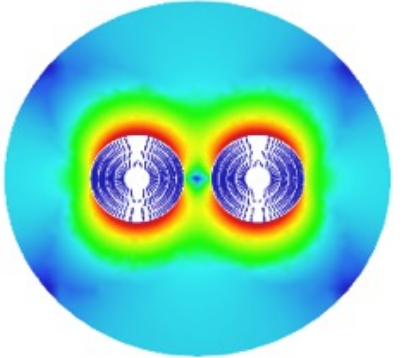


CHART2
Swiss Acc. Research & Technology

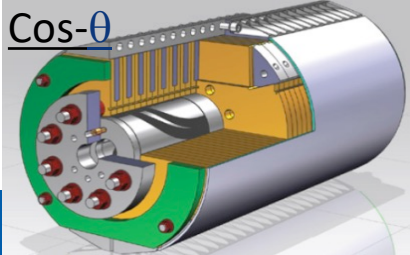
Canted Cos- θ (CCT)




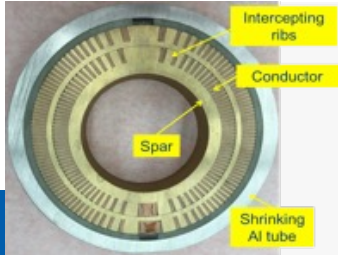
US

U.S. MAGNET DEVELOPMENT PROGRAM

Cos- θ



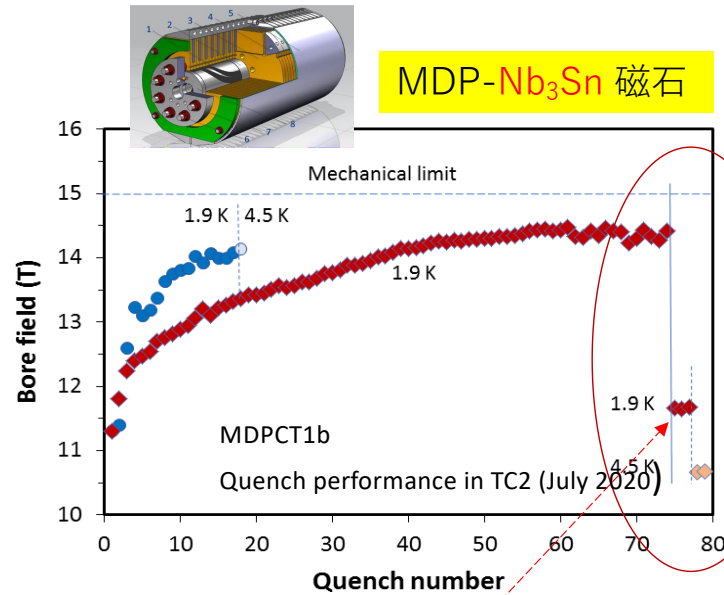
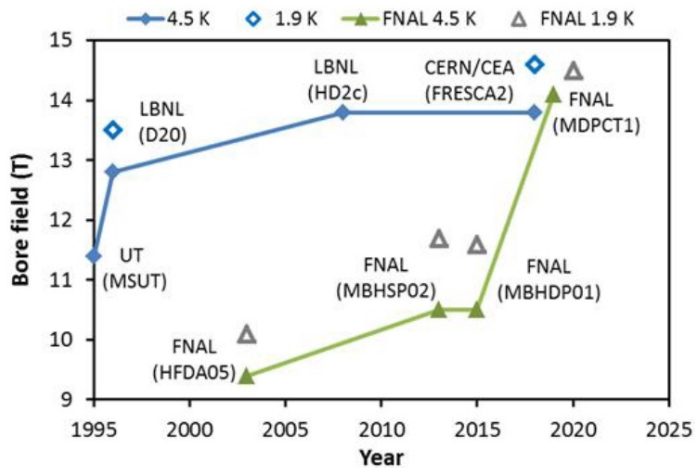
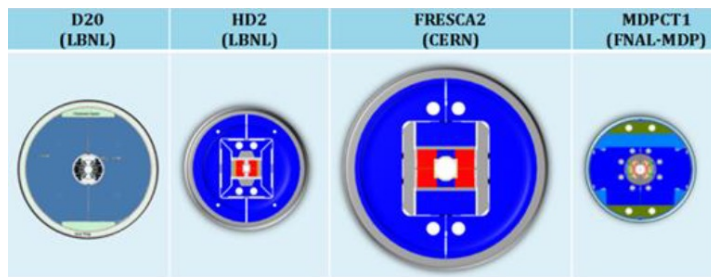
CCT
Pioneering work at LBNL



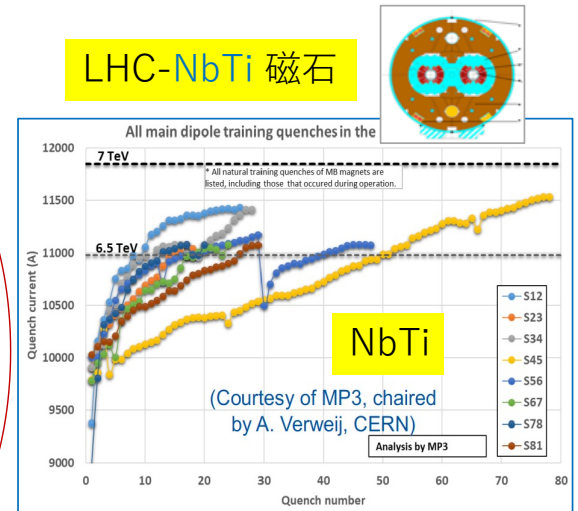
Eucard2 → ARIES → IFAST

US-MDPCT1b (**Nb3Sn**): Quench performance in TC1 and TC2 (July 2020) Compared with LHC Main Dipole (**NbTi**)

TC2 test target: *achieve ~14.5 T in magnet aperture @1.9 K*



- No retraining, all quenches in coil 5, RE, pole turn
- MDPCT1b reached its conductor limit at both temperatures
- 18% performance degradation wrt TC1
- **Nb3Sn** の課題: 突然の不可逆な Degradation”

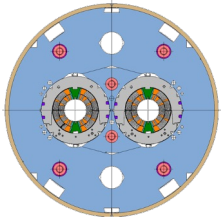


比較：NbTi では、Training が有効

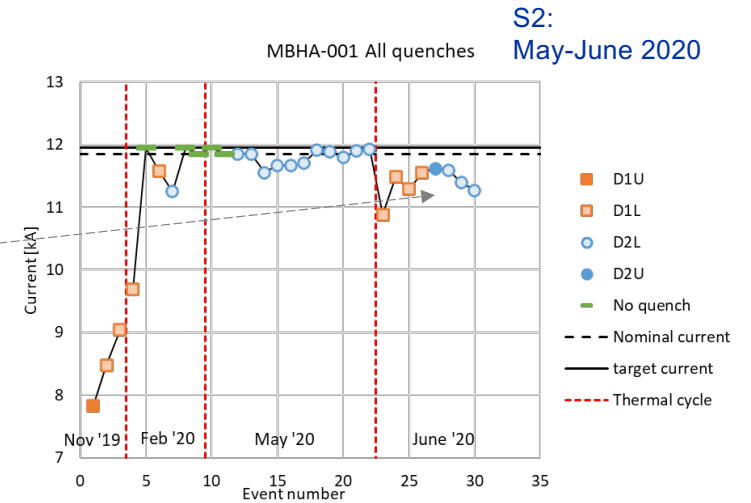
Performance of series HL-LHC, 11T Dipole S1 to S4

同様な課題 (Degradation)がHL-LHC, 11 T Dipole でも明らかになっている

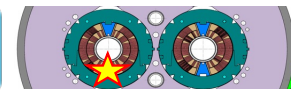
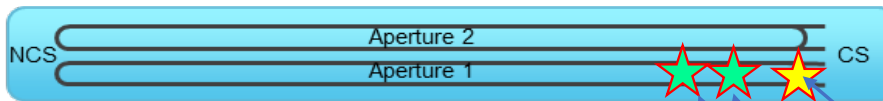
Courtesy: A. Devred,
G. Willering



- S1 met **specified performance**.
- S2, S4 showed **degradation after thermal cycles**



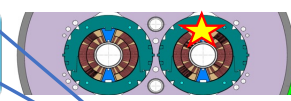
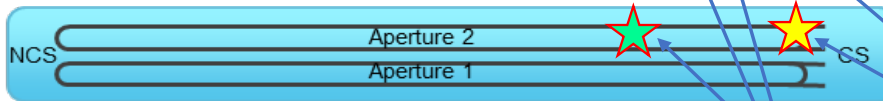
S2 – MBHA-001



Ap 1 Lower

Root-Cause Analysis
(in progress)

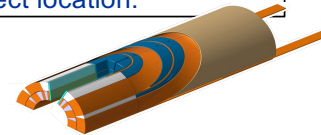
S4 – MBHB-003



Ap 2, upper

★ Additional quench locations related to, but away from defect location.

★ Quench location at defect location.



Cable of interest detailed examination shows:

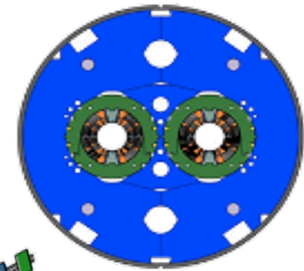
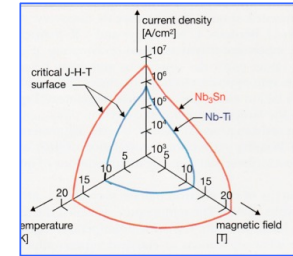
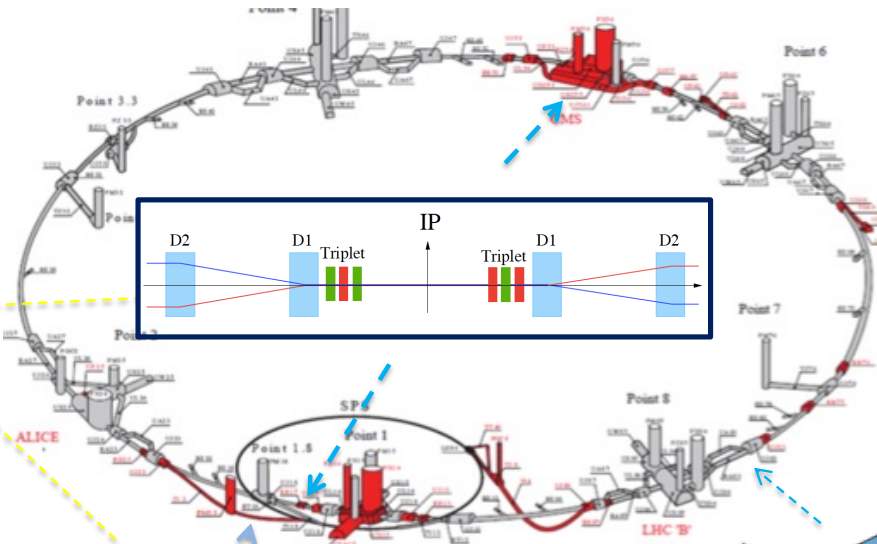
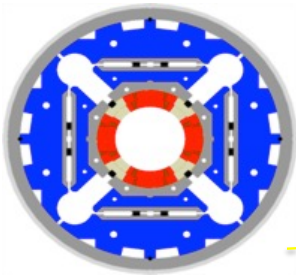
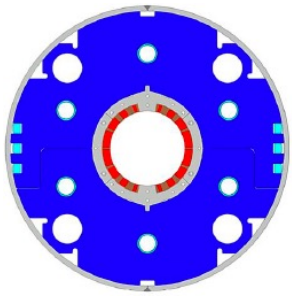
- The **presence of angular and radial cracks** at indicated plane (a few SC impacted from pop-out and other strands of the cable)
- **Pop-out/pop-in strands are embedded in resin** (some porosities are observed)
- **Copper** composing the strands is **in annealed state** (approx. 55-60 HV0.1)

Filaments belonging to different strands are affected by cracks in the SC phase



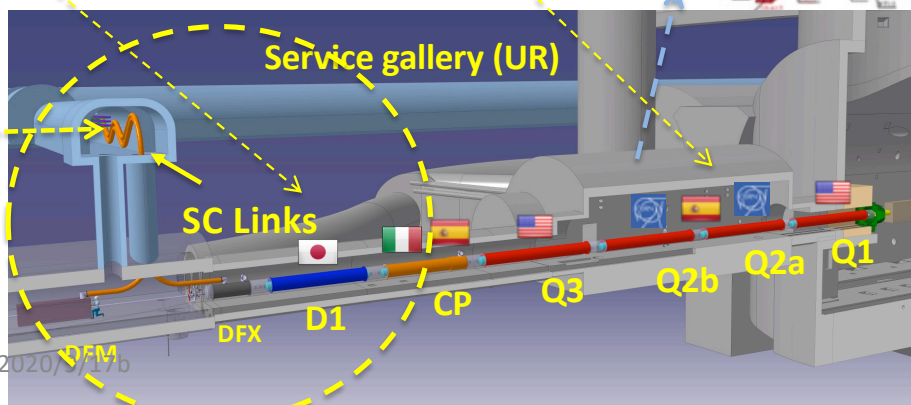
CERN-HL-LHC, Nb3Sn 超伝導磁石, MgB2 超伝導送電

IR Quad. (MQXF):
Nb3Sn,
IR Dipole (D1):
NbTi



Nb3S,
11-T Dipole

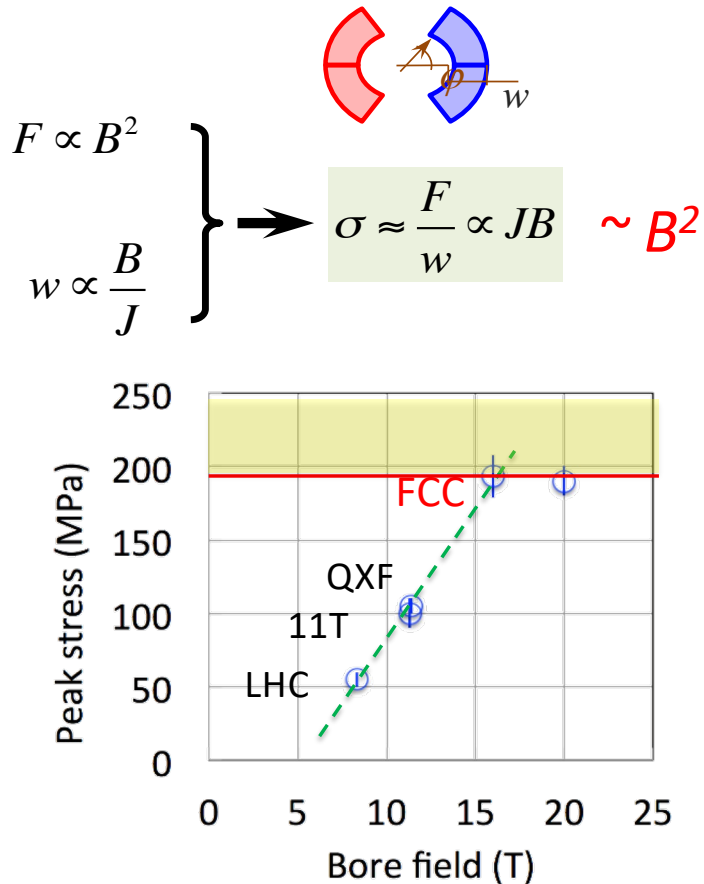
Superconducting Link;
MgB2



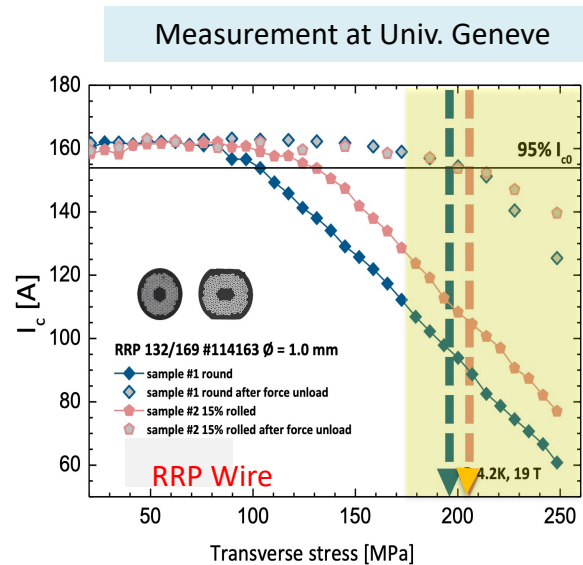
Installation postponed

A. Yamamoto, 2020/9/17b

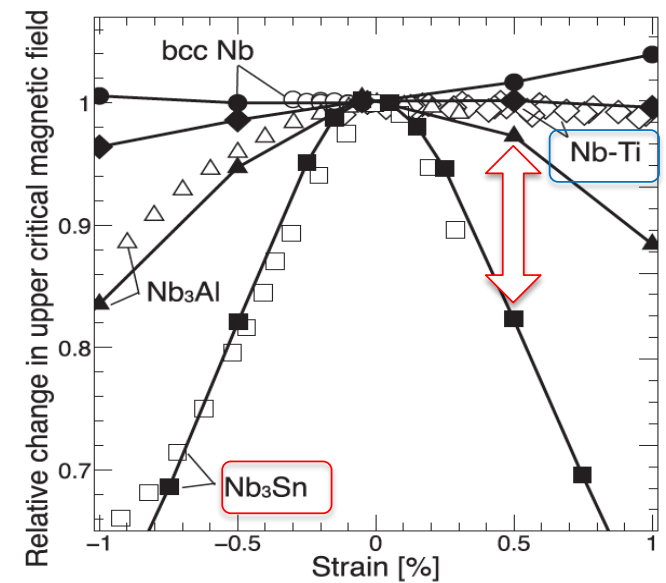
Mechanical Constrain to consider Operating Margin



Attention : I_c (J_c) reduction:
 • irreversible above ~ 170 MPa.



- **Large Impact** of Strain on J_c , reduction,
- **Nb3Sn** superconductor much different from **NbTi**



A.Godeke, F. Hellman, H.H.J ten Kate, and M.G.T. Mentink et al. Supercond. Sci. Technol. **31** (2018) 105011.

Personal Scope for HFM Development Timeline

for reaching Accelerator Construction and Operation

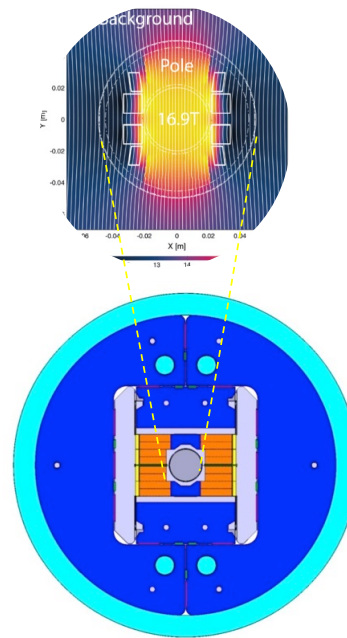
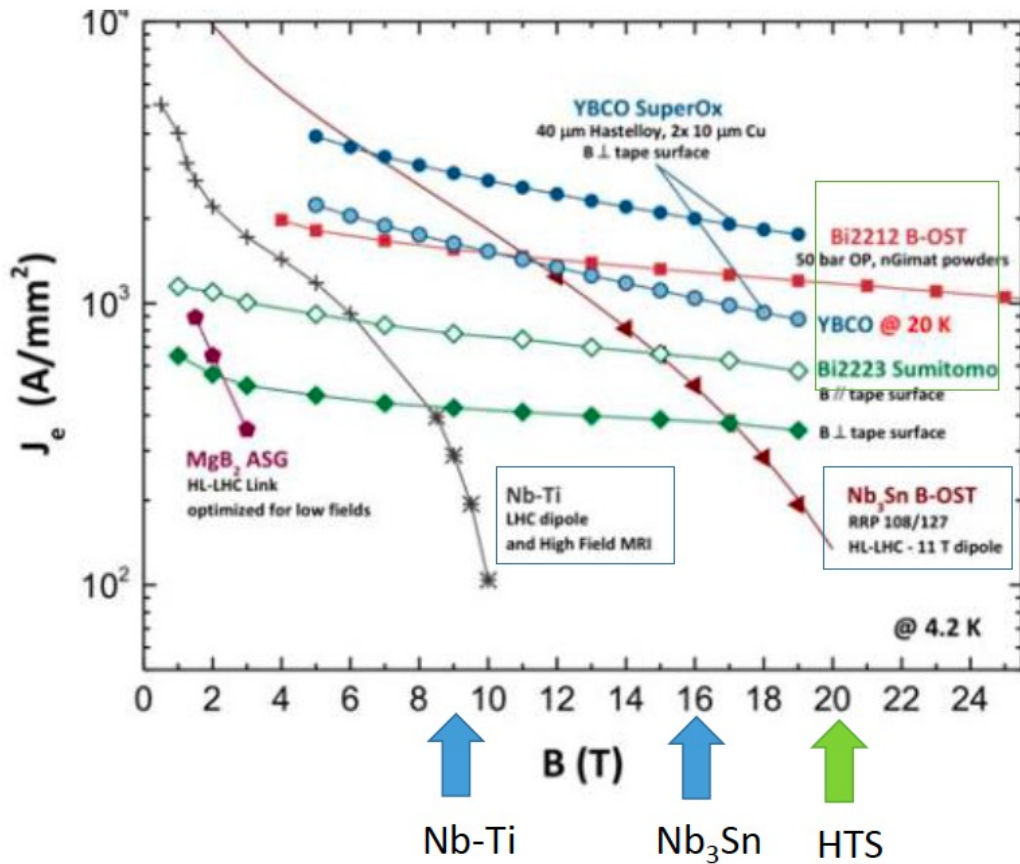
Timeline	~ 10	~ 20	~ 30	
12~14T Nb ₃ Sn	Short-model R&D	Proto/Pre-series	Construction	Operation
14~16T Nb ₃ Sn	Short-model R&D		Prototype/Pre-series	Construction
>16 T Nb ₃ Sn + HTS	Fundamental and Short Model R&D		Prototype/Pre-series	

Note: LHC experience: NbTi (10 T) R&D started in 1980's

--> (8.3 T) Production started in late 1990's, in ~ 15 years

→ LHC Operation started in later 2000's, in ~ 25 years

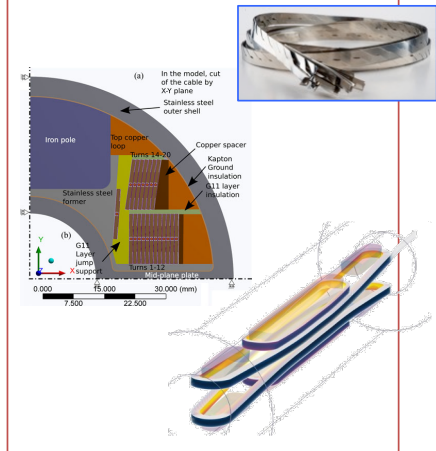
高磁場磁石におけるNbTi, Nb₃Sn, HTS の複合



Eucard2+ HTS-insert to be tested in 2019

EuCARD2: Feather-M2 (CERN),

flared Ends coil
 ReBCO, Roebel cable,
 stand alone tested Apr
 2017:
 Reached **3.37 T** @
 4.2K (I=6500A)

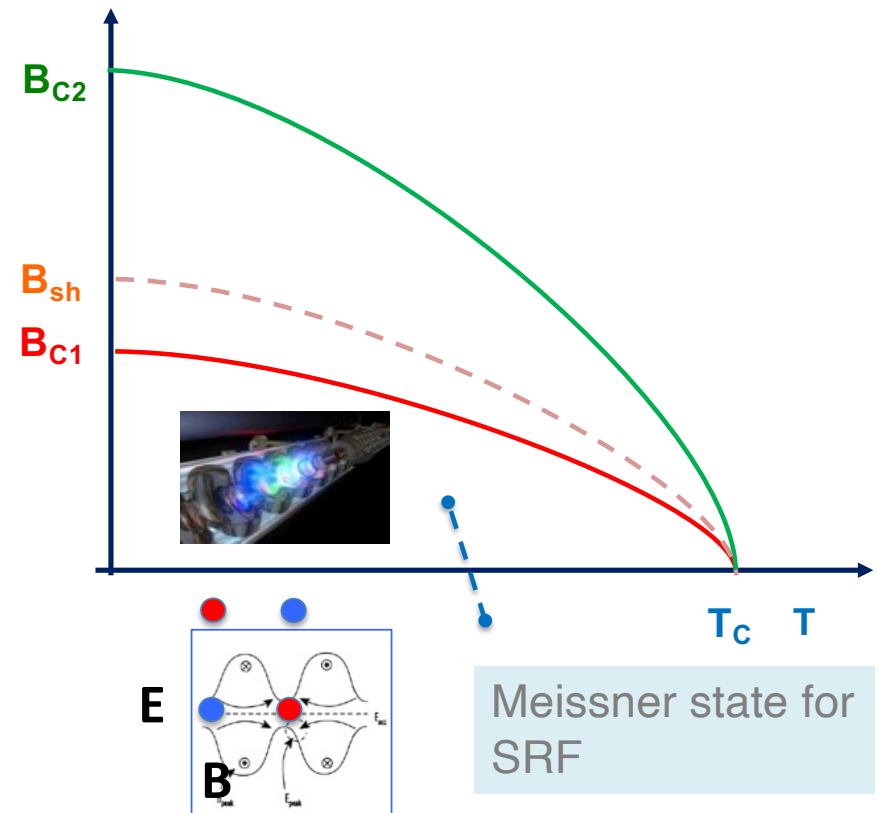


アウトライン

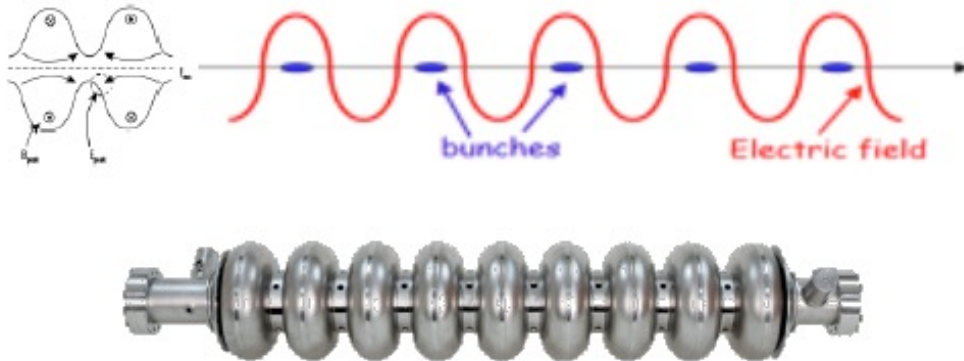
- はじめに
- 加速器における応用
 - 超伝導(電)磁石・
 - **超伝導高周波加速空洞**
- 粒子検出器における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり
 - **夜話ピックアップ**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- 未来への夢

Potential Nb and Nb₃Sn Applications (@ < B_{c2}) for Superconducting RF Cavity

Material	T _c [K]	B _c (0) [T]	B _{c1} (0) [T]	B _{sh} (0) [T]	B _{c2} (0) [T]
Nb	9.2	(0.25)	0.18	0.21	0.28
NbTi	9.2 ~ 9.5	--	0.067	--	11.5 ~ 14
Nb ₃ Sn	18.3	(0.54)	(0.05)	0.43	28 ~ 30
MgB ₂	39	(0.43)	(0.03)	0.31	39
Application				RF	Magnet



超伝導加速空洞



- 高周波表皮抵抗が低く、電力効率が低い
- 共振特性係数 (Q_0) が高く ($\sim 10^{10}$)
- ビームパルス長を長くできる ($\sim 10^{-3}$ 秒)
- 大口径化でき (> 50 mm)
- 動作周波数を ~ 1 GHz レベルに最適化
- ビーム強度・衝突輝度を高め易い。

$$E_{acc}^{max} = d \cdot \frac{r \cdot H_{crit,RF}}{\beta_{MAG} \cdot (H_{pk}/E_{acc})}$$

Gradient | Surface | Material
 Thermal conductance | Surface, Shape

~ 1.3 GHz, SRF Accelerators, worldwide



European XFEL
(in operation, 2017~)

- 800 cavities
- 100 CMs
- 17.5 GeV (Pulsed)



ESS
(under construction)

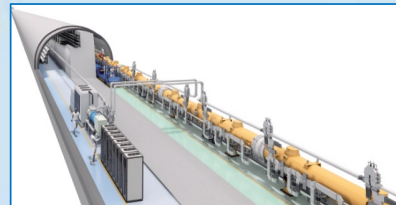


SHINE
(under construction)

- ~600 cavities
- 75 CMs
- 8 GeV (CW)

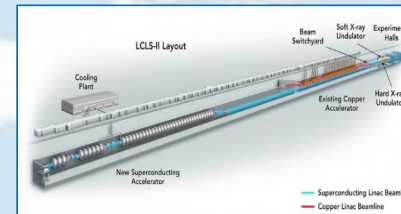


S1 Global:
DESY, Fermilab, KEK
8-cavity string Test,
2010



ILC (planned)

- 8,000 9-cell cavities
- 900 CMs
- 2 x 125 GeV (Pulsed)



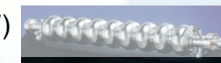
LCLS-II
(under construction)

- 280 cavities
- 35 CMs
- 4 GeV (CW)



JLab-CEBAF
(in operation)

- 40 CMs
- 6~12 GeV(CW)



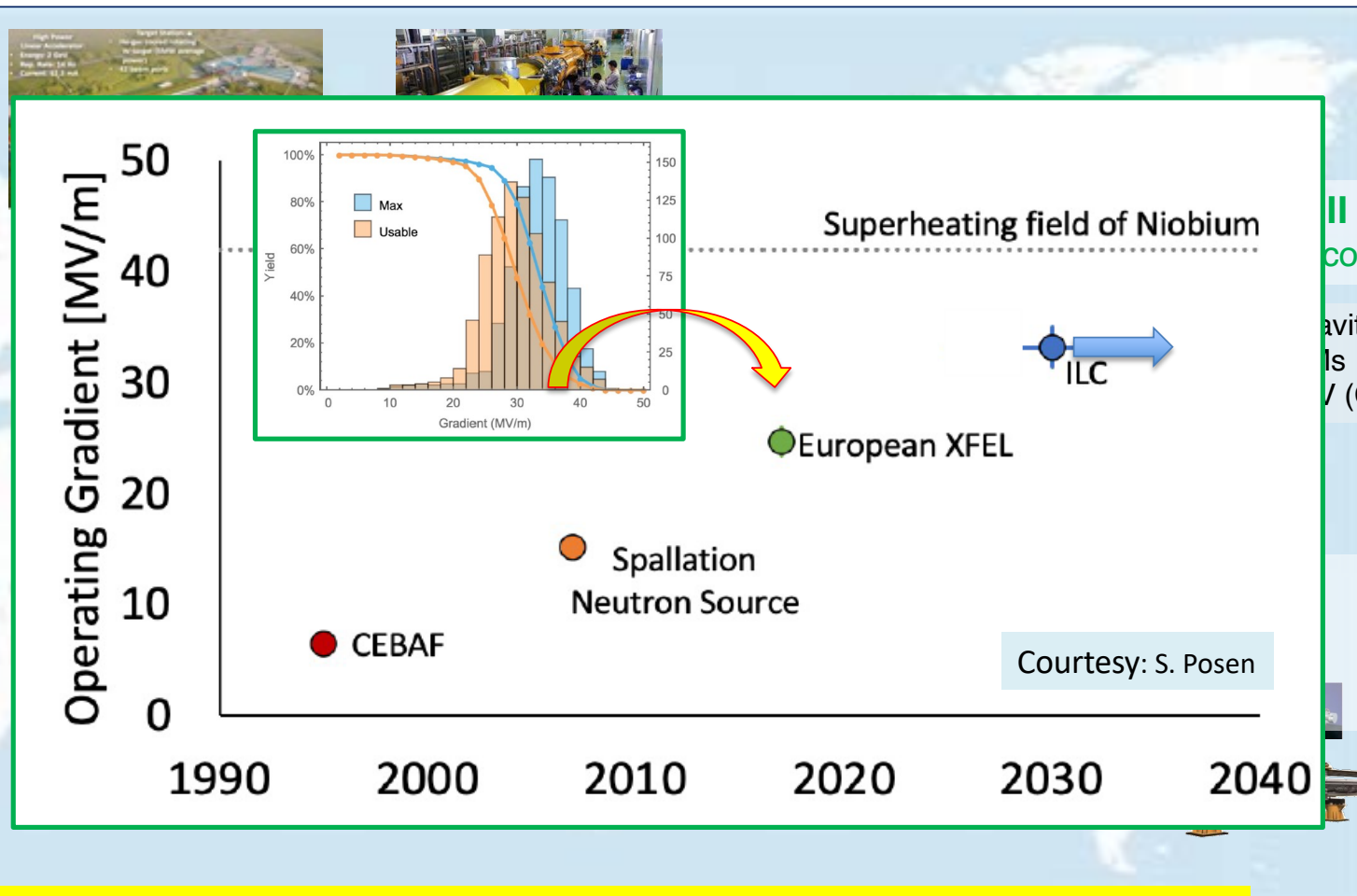
~ 2,000 1.3 GHz SRF cavities being realized, even in these 10 years !

~ 1.3 GHz, SRF Accelerators, worldwide



European XFEL
(in operation, 2017~)

- 800 cavities
- 100 CMs
- 17.5 GeV (Pulsed)



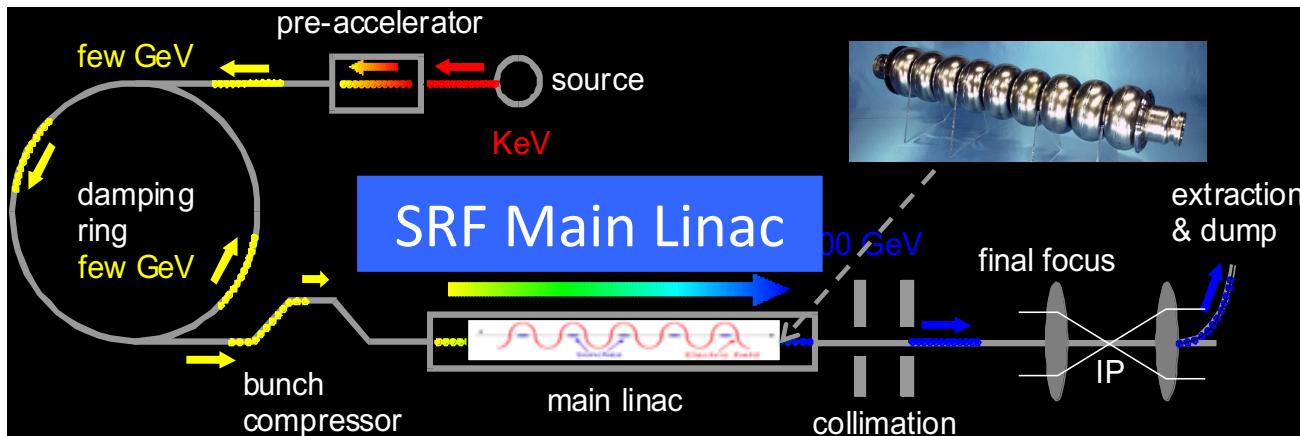
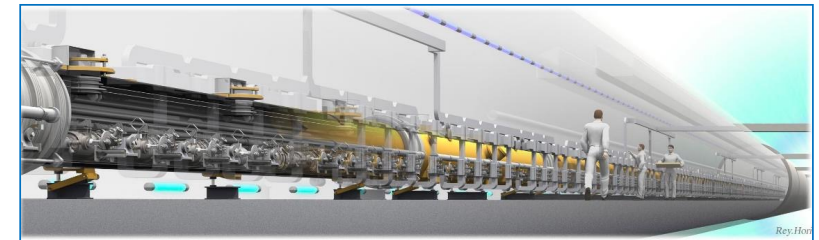
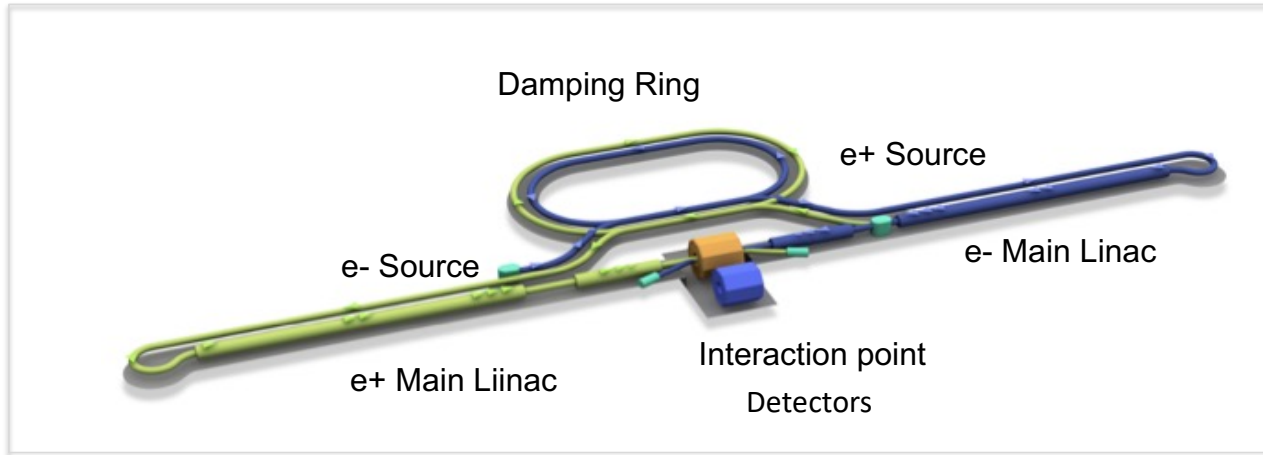
II
(construction)

cavities
Is
/ (CW)

Courtesy: S. Posen

~ 2,000 1.3 GHz SRF cavities being realized, even in these 10 years !

SRF: Key Technology at ILC:



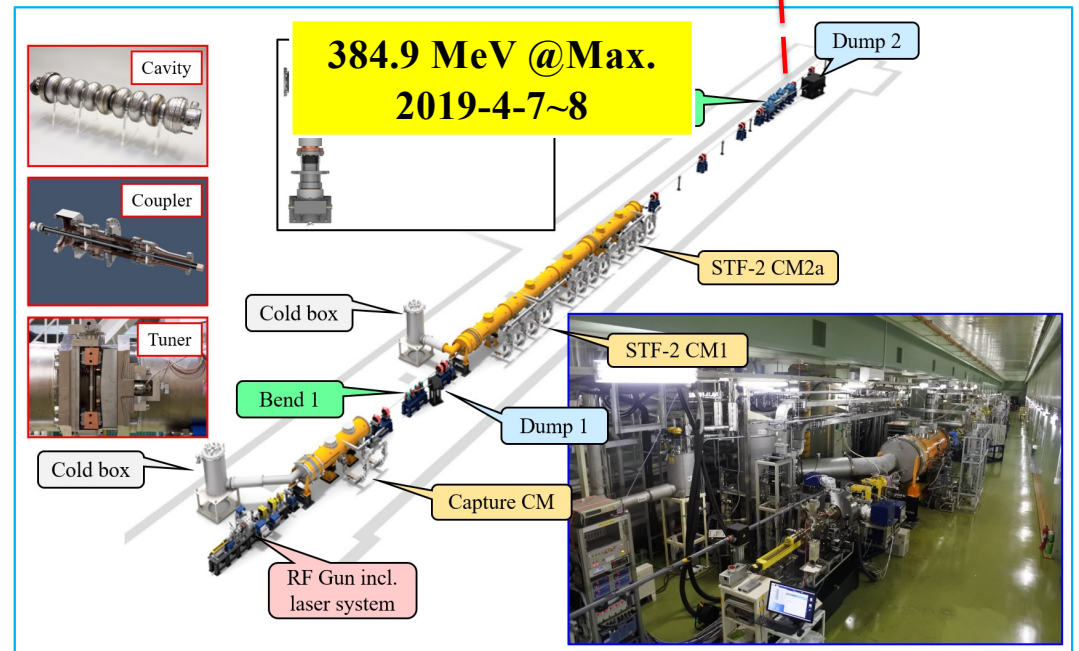
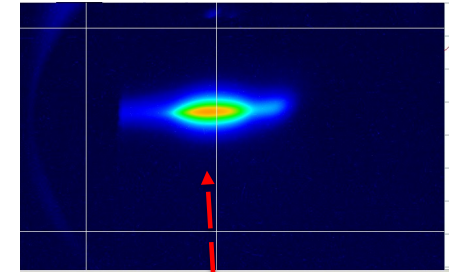
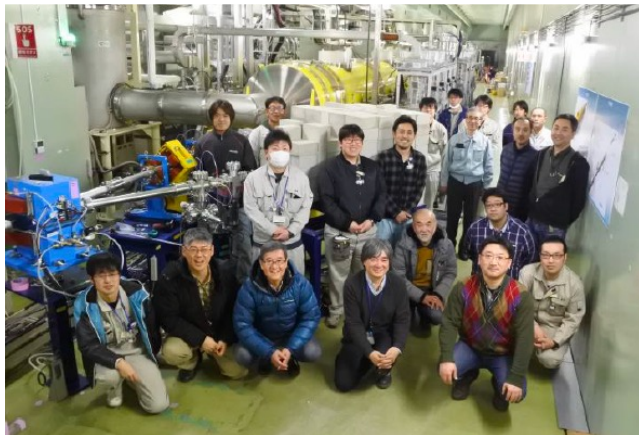
A. Yamamoto, 2022/9/7

Parameters	Value
Beam Energy	125 GeV
Beam Rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.73 ms
Av. field gradient	31.5 (35) MV/m +/-20% Q ₀ = 1E10 (1.6E10)
# 9-cell cavity (1.3 m)	~ 8,000 (x 1.1)
# cryomodule (12.m)	~ 900
# Klystron	~ 240

KEK-STF: 超伝導加速器によるビーム加速の達成



図 11. KEK-SRF 試験施設 (STF). 加速電界 33 MV/m によるビーム加速に成功.



応用展開

Compact ERL (cERL)

Compact ERL (cERL) has been constructed in 2013 at KEK to demonstrate energy recovery with low-emittance, high-current CW beams of more than 10 mA for future multi-GeV ERL.

Circumference ~ 90m

Beam Dump

Main LINAC

Margers

Injector LINAC

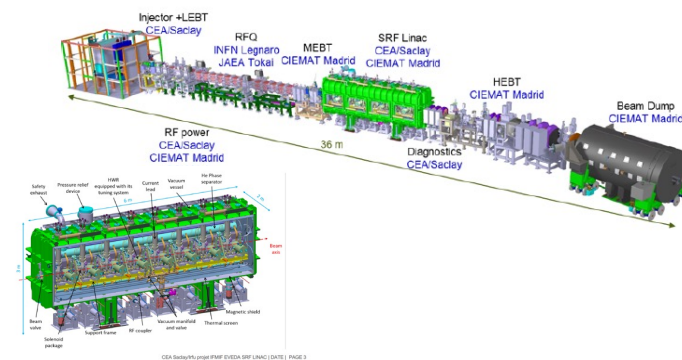
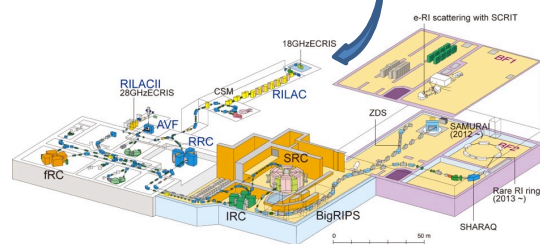
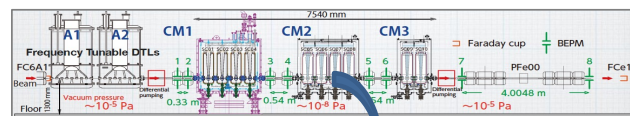
9-cell SC cavity x 2

RF frequency = 1.3 GHz 17.7 MeV

Design parameters of the cERL

Nominal beam energy	35 MeV → 20 MeV
Nominal Injector energy	5 MeV → 2.9 MeV
Beam current	10 mA (initial goal)

2-cell SC cavity x 3



KEK ERL

- Compact Energy Recovery ライナック

理研重イオン超伝導ライナック

QST-IFMIF 超伝導ライナック



アウトライン

- はじめに
- 加速器における応用
 - 超伝導(電)磁石
 - 超伝導高周波加速空洞
- **粒子検出器**における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり
 - —————
 - **夜話ピックアップ**—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- **未来への夢**

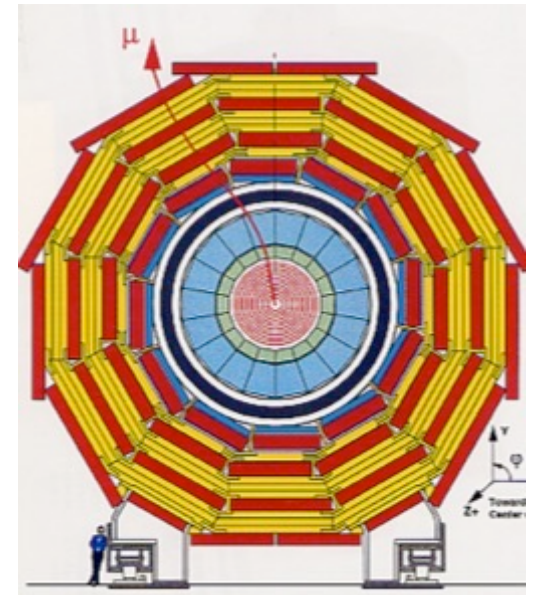
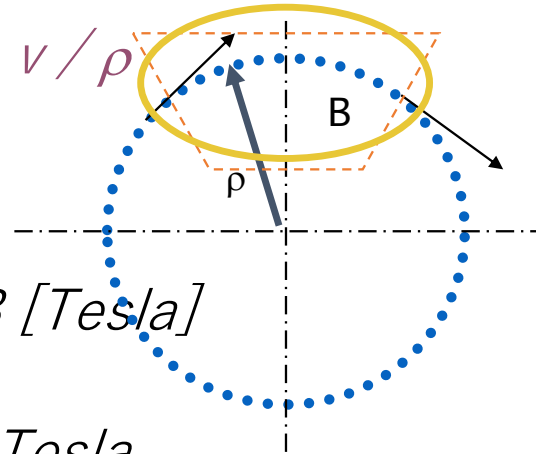
磁場中での荷電粒子の動き

• 基本式

- ローレンツ力と遠心力のバランス
- $F = q \cdot v \cdot B = mv^2 / r = p \cdot v / \rho$

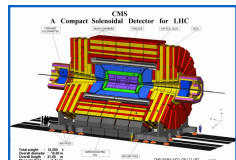
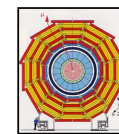
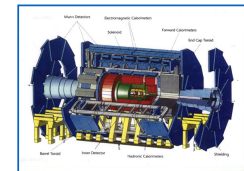
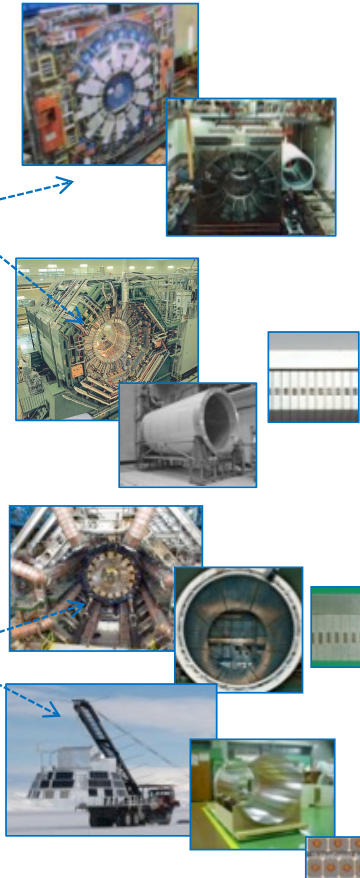
$$p = q \cdot \rho \cdot B$$

- $P [GeV/c] = 0.3 \cdot \rho [m] \cdot B [Tesla]$
- $1 GeV/c = 0.3 \times 3.33 m \times 1 Tesla$



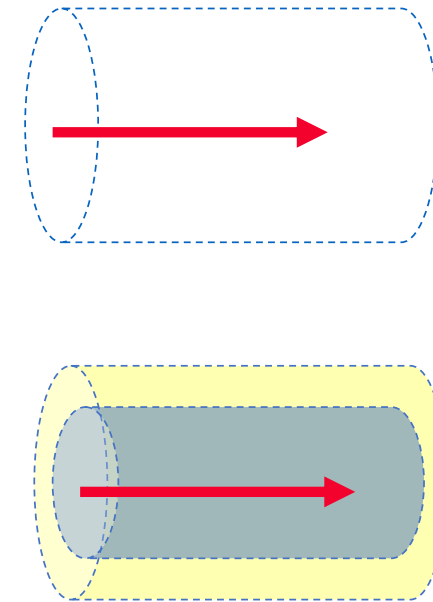
History of Detector Solenoids

Experiment	Laboratory	R (m)	B (T)	I (kA)	X (X_0)	E/M (kJ/kg)	E (MJ)	Year
PLUTO	DESY	0.75	2.2	1.3	4.0	2.3	4.1	1972
ISR point 1	CERN	0.85	1.5	2	1.1	1.8	3.0	1977
CELLO	Saclay/DESY	0.85	1.5	3	0.6	5.0	7.0	1978
PEP4/TPC	LBL/SLAC	1.1	1.5	2.27	0.83	7.6	11	1983
CDF	KEK/FNAL	1.5	1.6	5	0.84	5.4	30	1984
TOPAZ	KEK	1.45	1.2	3.65	0.70	4.3	19	1984
VENUS	KEK	1.75	0.75	4	0.52	2.8	11.7	1985
AMY	KEK	1.2	3	5	N/A	N/A	40	1985
CLEO-II	Cornell	1.55	1.5	3.3	2.5	3.7	25	1988
ALEPH	Saclay/CERN	2.75	1.5	5	2.0	5.5	136	1987
DELPHI	RAL/CERN	2.8	1.2	5	1.7	4.2	110	1988
ZEUS	INFN/DESY	1.5	1.8	5	0.9	5.2	10.5	1988
H1	RAL/DESY	2.8	1.2	5	1.8	4.8	120	1990
BESS	KEK	0.5	1.2	0.38	0.2	6.6	0.25	1990
WASA	KEK/Uppsala	0.25	1.3	0.9	0.18	6	0.12	1996
BABAR	INFN/SLAC	1.5	1.5	6.83	0.5	N/A	27	1997
D0	FNAL	0.6	2.0	4.85	0.9	3.7	5.6	1998
BELLE	KEK	1.8	1.5	4.16	N/A	5.3	37	1998
ATLAS-CS	KEK/CERN	1.25	2.0	7.8	0.66	7.1	38	2001
BESS-polar	KEK	0.45	1.0	0.48	0.156	9.2	0.34	2005
CMS	CMS/CERN	3.0	4.0	19.5	N/A	12	2600	2007
BESIII	IHEP (China)	1.45	1.0	5	N/A	2.6	9.5	2008
CMD-3	BINP	0.35	1.5	1	0.085	8.2	0.31	2009



なぜ超伝導が必要か？

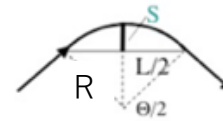
- 大規模磁場空間：
 - **運動量分析**
 - 磁場空間：できる限り、強く、大きく
 - **物質の低減**
 - 粒子軌道を乱さない、相互作用しない
 - 透明性：コイルをできる限り少ない物質で
 - **エネルギーの節約**
- 課題
 - 大きな蓄積エネルギー
 - 一つの磁石



粒子検出器用超伝導磁石における基本式

• Deflection: $dp/p \sim \{B \cdot R\}^{-1}$

• Sagitta: $s \sim \{B \cdot R^2\}^{-1}$



$$\begin{aligned}
 s [m] &= r (1 - \cos q/2) \\
 &= \sim prq^2/8 \\
 &= qBL^2/8r \\
 &= 0.3 BL^2 / 8r \\
 & \quad [Tm^2/GeV/c]
 \end{aligned}$$

• Magnetic Field: $\text{rot } B = \mu_0 J$

• Stored Energy: $E = 1/2 \mu_0 \text{Int. } B^2 dv$

• Coil Mass: $M = V_{\text{coil}} \gamma$

• Pressure: $p = B^2/2\mu_0$

• Hoop Stress: $\sigma_{\text{hoop}} = (R/t) \cdot p$

• Wall thickness: $t = (R/\sigma_h) \cdot p$

• E/M ratio: $E/M = (B^2/2\mu_0) \cdot R/2\gamma$
 $= \sigma_h/2\gamma \rightarrow \text{high-stress / material-density !!}$

B:	magnetic field
μ_0 :	magnetic permeability
V_{field} :	magnetic volume
V_{coil} :	coil volume
γ :	effective density
σ_{hoop} :	hoop stress
R:	coil radius
t:	coil thickness

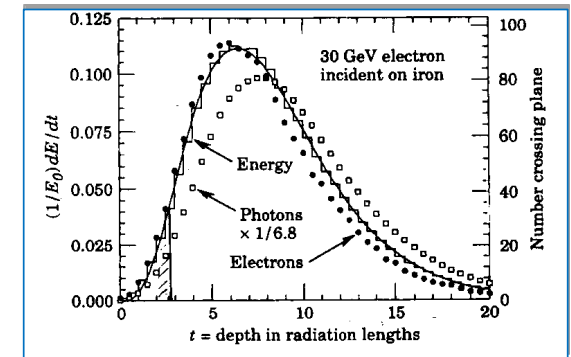
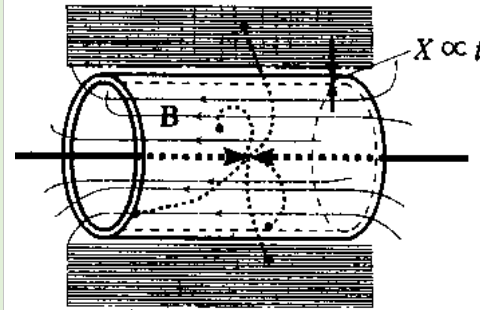
透明な磁場(空間)への挑戦

- 磁場を強く、磁石物質を透明に、、、
磁場 (B):

$$\text{rot } B = \mu_0 J$$

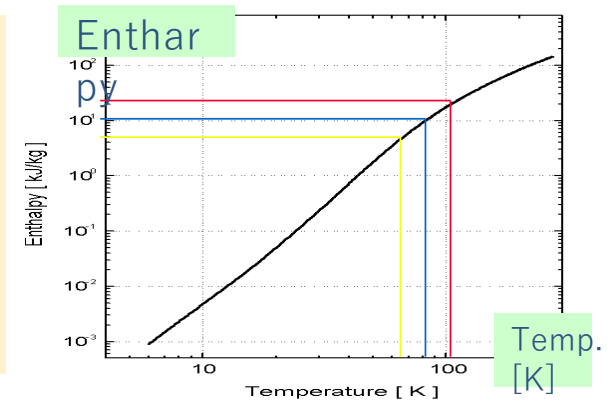
透明度・輻射長(X) $t \propto RB^2 / (E/M) \propto \gamma / \sigma_h$

- E/M (蓄積エネルギー／コイル重量)を高く
- 超伝導線を強く、、、
- クエンチ保護:
 - 伝播を速く → 均等に温度上昇(エネルギー吸収)
- 伝導冷却 (冷却管からの伝導冷却)
 - 2層流He 強制フロー or サーモサイフォン
- クライオスタットを軽く、透明に、、



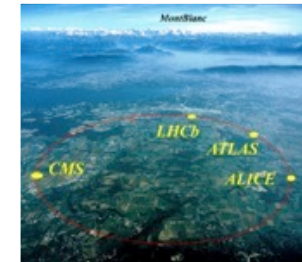
E/M → Enthalpy (H)
H: Integral {C_p} dT

20 kJ/kg → ~100 K
10 kJ/kg → ~80 K
5 kJ/kg → ~65 K

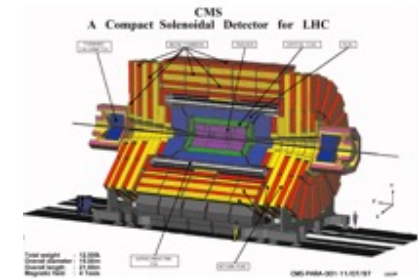
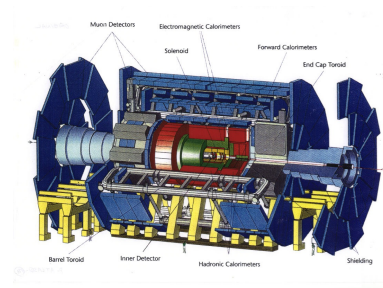


LHC計画におけるAI 安定化超伝導磁石の進展

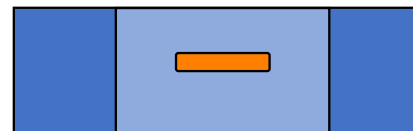
LHC - ATLAS, - CMS



- Reinforcement of Al
 - with keeping low resistivity
- Uniform reinforcement
 - Micro-alloying and cold work
 - ATLAS-CS



- Hybrid reinforcement
 - Welding Al-Alloy with pure-Al
 - CMS



SDC / ATLAS	CMS

透明な磁場(空間)への挑戦

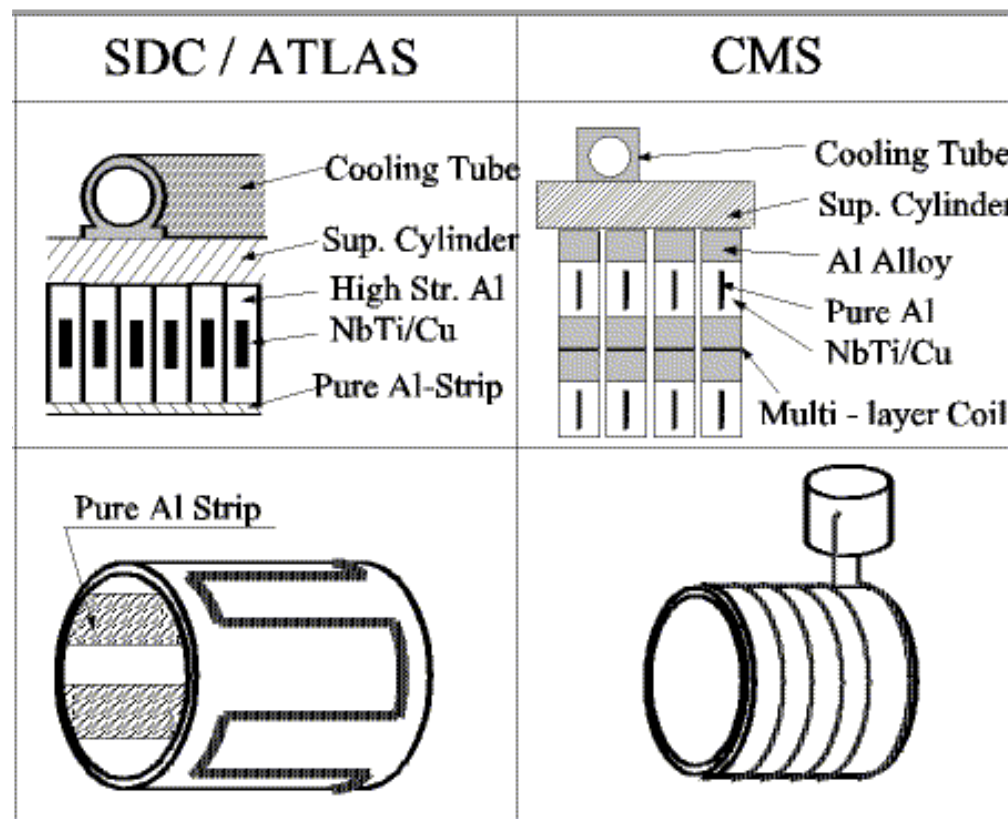
- 磁場を強く、磁石物質を透明に、、、

磁場 (B) :

$$rot \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

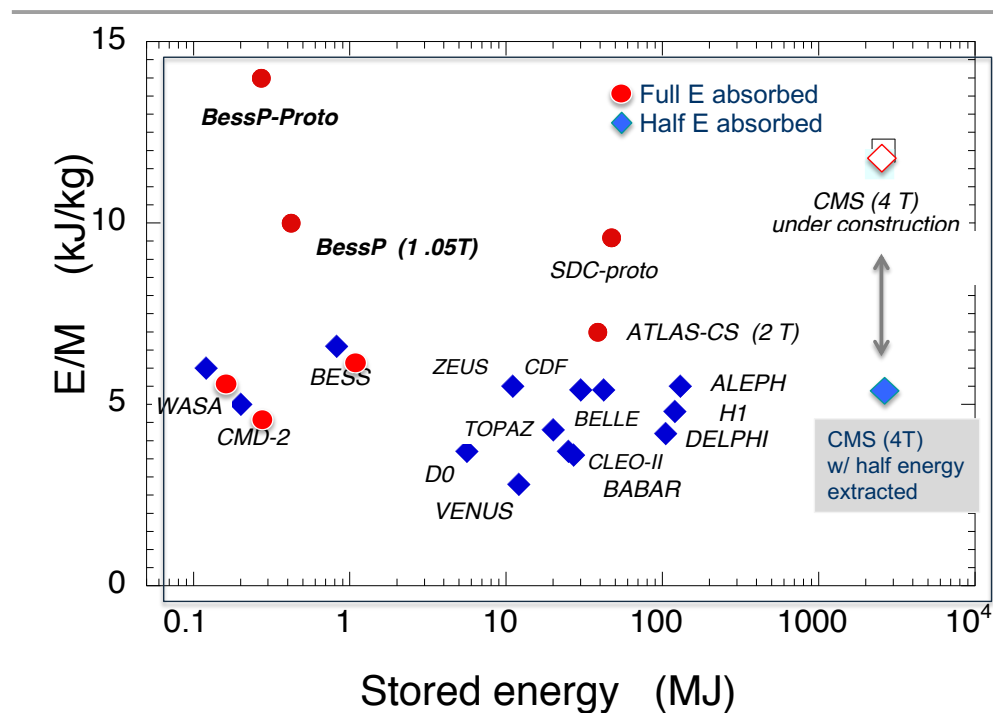
透明度・輻射長(X) $t \propto RB^2 / (E/M) \propto \gamma / \sigma_h$

- E/M (蓄積エネルギー/コイル重量) を高く
 - 超伝導線を強く、、、
- クエンチ保護 :
 - 伝播を速く → 均等に温度上昇 (エネルギー吸収)
- 伝導冷却 (冷却管からの伝導冷却)
 - 2層流He 強制フロー or サーモサイフォン
- クライオスタットを軽く、透明に、、



透明な磁場(空間)への挑戦

- 磁場を強く、磁石物質を透明に、、、
磁場 (B): $rot B = \mu_0 J$
- 透明度・輻射長(X) $t \propto RB^2 / (E/M) \propto \gamma / \sigma_h$
 - E/M (蓄積エネルギー/コイル重量)を高く
 - 超伝導線を強く、、、
- クエンチ保護:
 - 伝播を速く → 均等に温度上昇(エネルギー吸収)
- 伝導冷却(冷却管からの伝導冷却)
 - 2層流He 強制フロー or サーモサイフォン
- クライオスタットを軽く、透明に、、



透明な磁場(空間)への挑戦

- 磁場を強く、磁石物質を透明に、、、

磁場 (B): $rot B = \mu_0 J$

透明度・輻射長(X) $t \propto RB^2 / (E/M) \propto \gamma / \sigma_h$

- E/M (蓄積エネルギー／コイル重量)を高く
- 超伝導線を強く、、、

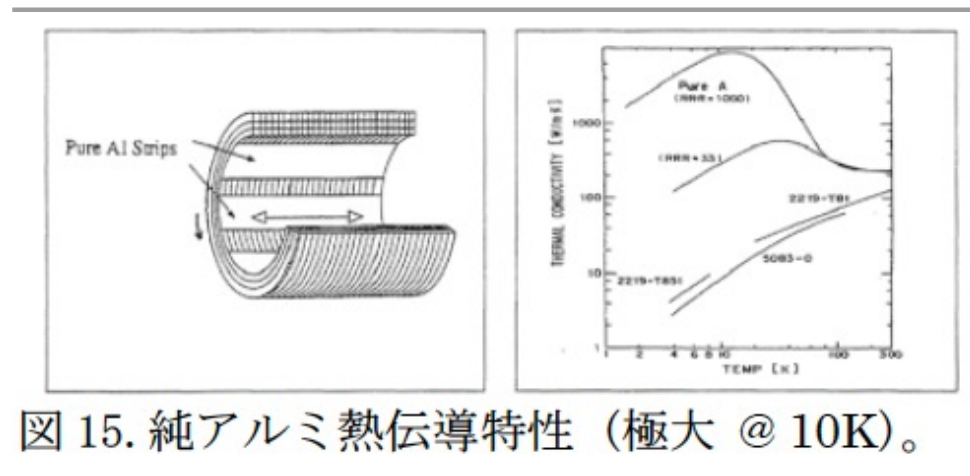
- クエンチ保護:

- 伝播を速く → 均等に温度上昇(エネルギー吸収)

- 伝導冷却 (冷却管からの伝導冷却)

- 2層流He 強制フロー or サーモサイフォン

- クライオスタットを軽く、透明に、、



周方向クエンチ伝播速度:

$$V_{\phi} = (J/\gamma C) \cdot \{L_0 T_s / (T_c - T_0)\}^{1/2}$$

軸方向クエンチ伝播速度:

$$V_z = (k_z/k_{\phi})^{1/2} \cdot v_{\phi}$$

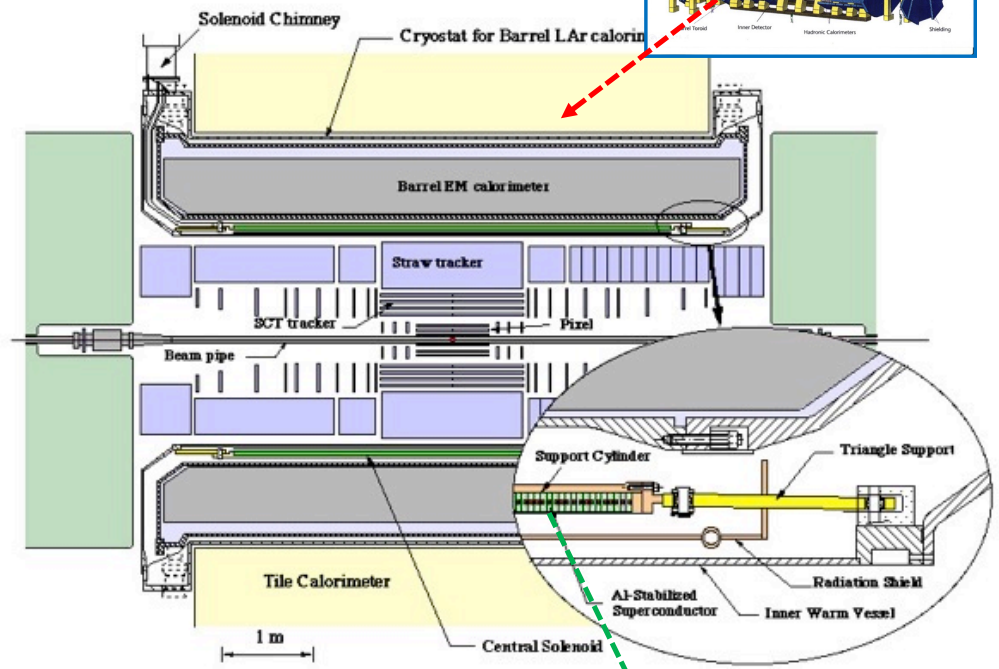
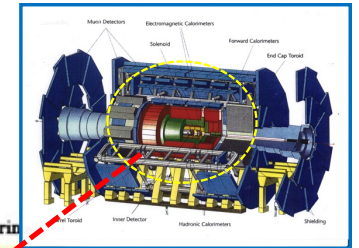
透明な磁場(空間)への挑戦

- 磁場を強く、磁石物質を透明に、、、

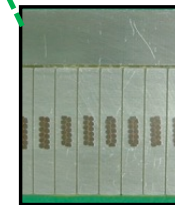
磁場 (B) : $rot B = \mu_0 J$

透明度・輻射長(X) $t \propto RB^2 / (E/M) \propto \gamma / \sigma_h$

- E/M (蓄積エネルギー／コイル重量) を高く
 - 超伝導線を強く、、、
- クエンチ保護：
 - 伝播を速く → 均等に温度上昇 (エネルギー吸収)
- 伝導冷却 (冷却管からの伝導冷却)
 - 2層流He 強制フロー or サーモサイフォン
- クライオスタットを軽く、透明に、、、



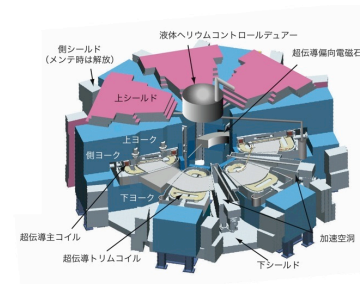
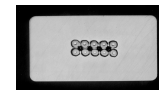
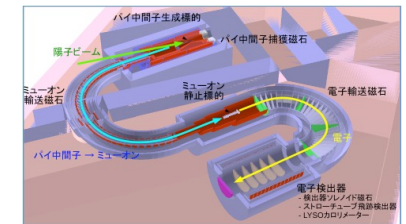
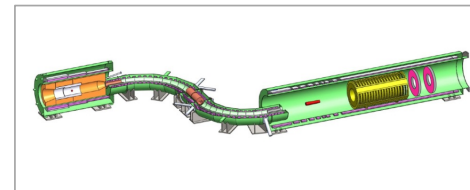
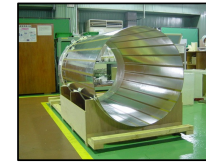
- LAr カロリメータと真空容器を共有
- 独自の真空容器を持たない



応用展開(例)

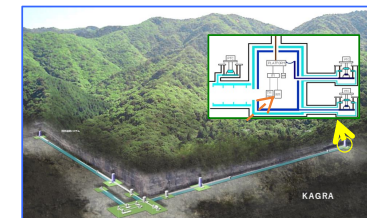
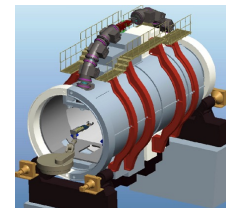
アルミ安定化磁石技術

- 宇宙観測
- ミュオンビーム実験
- 原子核実験
 - 理研・SC サイクロトロン



伝導冷却技術

- 重粒子線医療ビームライン
- 重力波探索実験



アウトライン

- はじめに
- 加速器における応用
 - 超伝導(電)磁石・
 - 超伝導高周波加速空洞
- 粒子検出器における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり

 - **夜話トピックス**— 宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- 未来への夢

南極周回気球・超伝導スペクトロメータ-による 宇宙起源反粒子の探索

Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer: BESS



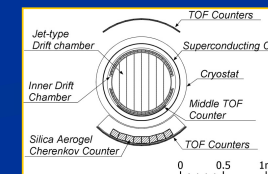
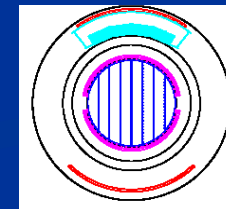
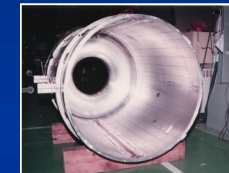
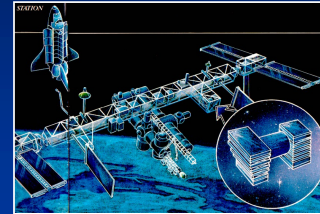
History to Search for Cosmic-ray Antiparticle

- 1979: First Observation (Golden et al)
- 1981: Excessive Flux? (Buffington et al)
- 1985: **ASTROMAG**
Proposal of thin solenoid spectrometer

- 1987: **BESS** proposed by Prof. Orito
- 1993: **BESS**: 6 antiproton observed

Energy spectrum
Solar Minimum
Primary origin?
- 1996: **AMS-1**
Solar maximum
- 1998: **AMS-1**
- 2000: Solar maximum
- 2004: **BESS-Polar, PAMELA**
- 2007/8 **Solar Minimum, BESS-Polar II**

- 2011: **AMS-02**



反粒子で探る初期宇宙の姿

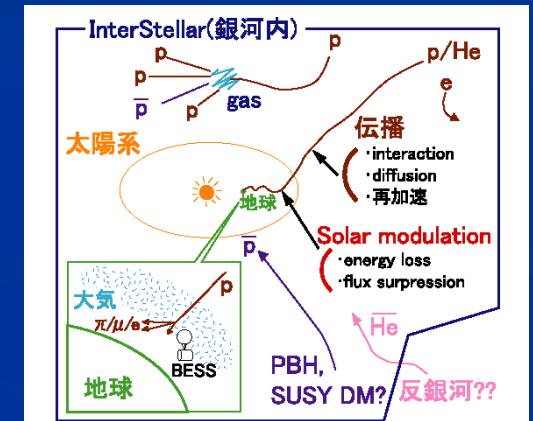
反物質の謎?

- 観測されていない
- (He/He の存在比上限値: 7×10^{-7})
- 宇宙初期に消滅?

反陽子?

- 僅かに観測されている
(陽子に対して $< 10^{-4}$)
- ほとんどは、宇宙線の衝突を起源?
→ 二次粒子
- 宇宙初期現象を起源?
→ ミニ(原始)ブラックホールの蒸発?

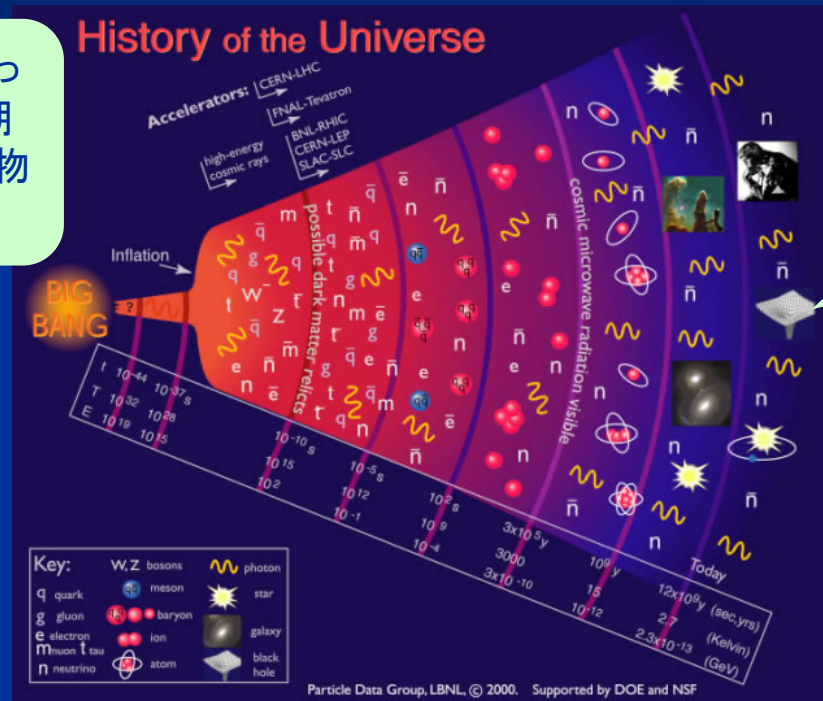
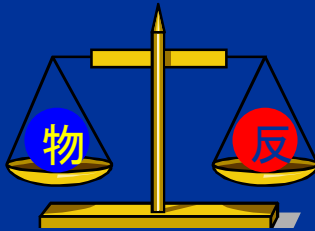
現在: 137億年



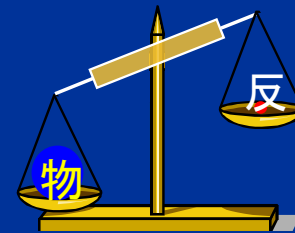
10^{-34} 秒

宇宙から消滅した？反物質 --- 宇宙線観測を通じた直接探索

宇宙は“無”から始まったとすれば、宇宙初期には物質と等量の反物質があったはず。



現在の宇宙には反物質は見つからない。

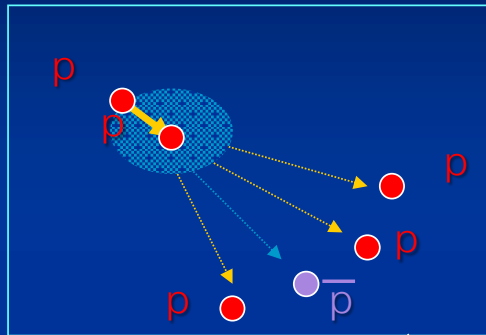


137億年

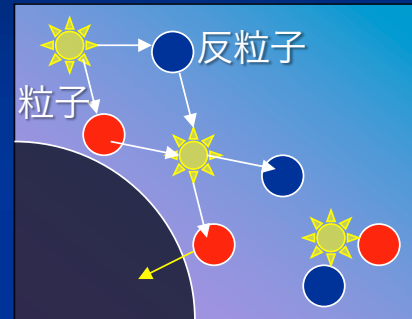
宇宙の進化の途中で反物質が消え去った!?

消え去っていなければ星も生物も存在できなかったはず。

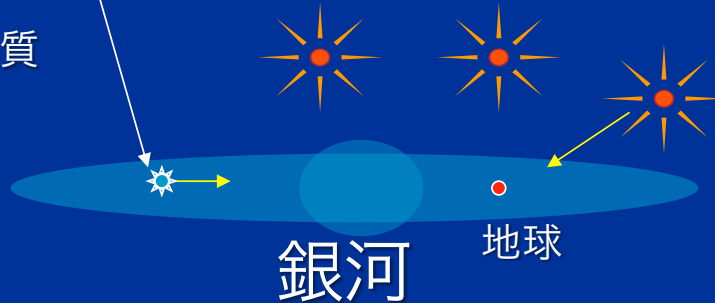
宇宙線反陽子の起源



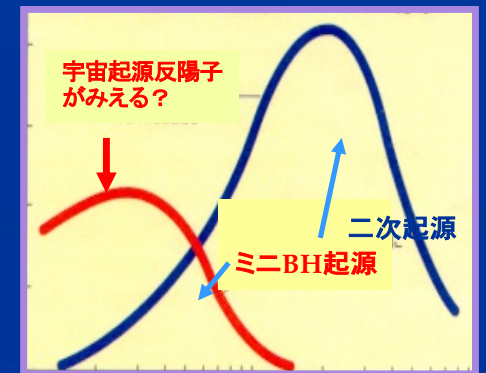
宇宙線の星間物質との衝突から



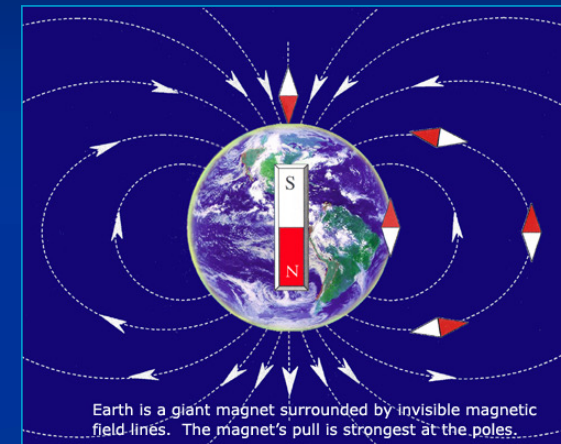
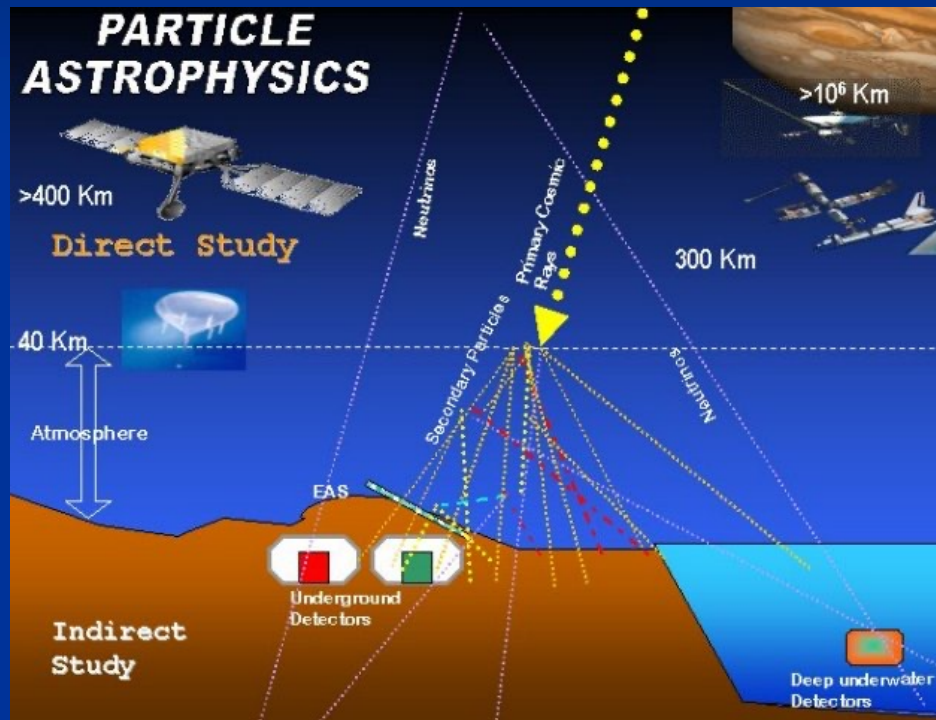
ミニブラックホールの蒸発から



宇宙線衝突を起源とした二次的な反陽子がほとんど。しかし低エネルギーでは、ミニBHを起源とする反陽子が見つかるかもしれない。反陽子の観測を通して初期宇宙の素粒子像を探る！



宇宙粒子線の観測：宇宙・気球・地上・地下



- 南極での観測の特色：
- 地球地場が垂直
 - 電流と磁力線が並行(相互作用しない)
 - 荷電粒子が地上に到達しやすい

荷電粒子を観測する

- 磁場中で軌跡を振り分ける

ローレンツ力と遠心力のバランス

$$F = v \times B = mv^2/r$$

運動量、極性を測る

$$P = m \times v \propto r \times B$$

- 電荷(数)を識別する

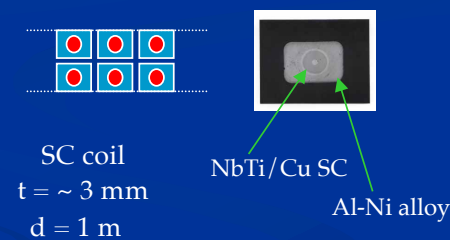
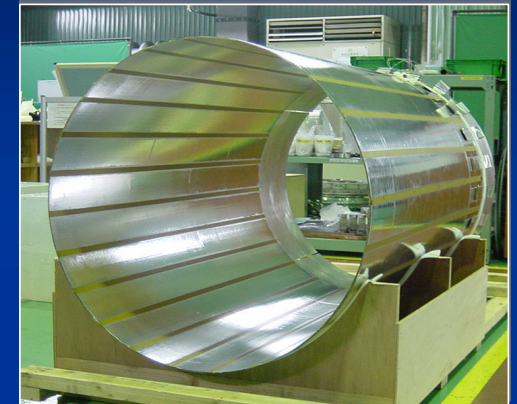
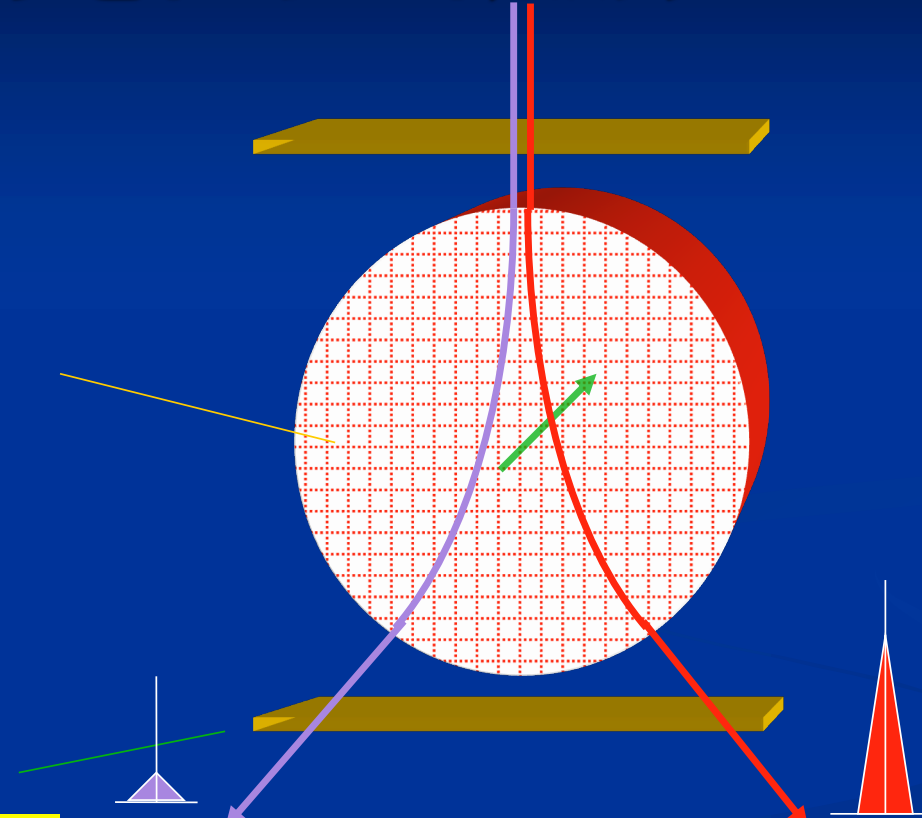
$$dE/dx \propto Z^2$$

- 速度を計り、質量を決定

$$m = p/v = p/c\beta\gamma$$

$$m^2 = R^2 e^2 Z^2 (\beta^{-2} - 1)$$

正負の荷電粒子を左右に振り分ける



肉厚(t)/直径(d):アルミ缶容器に相当

A achievement for a cosmic-ray spectrometer for scientific ballooning



Coil thickness / diameter

~ 0.34%

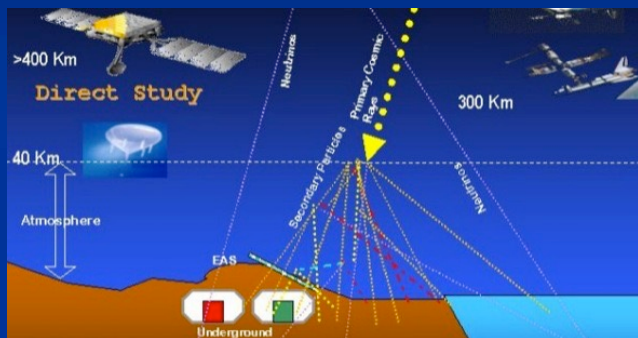
thickness / diameter

~ 0.2%

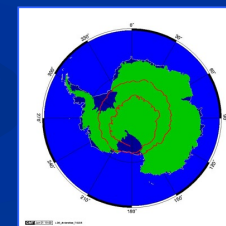
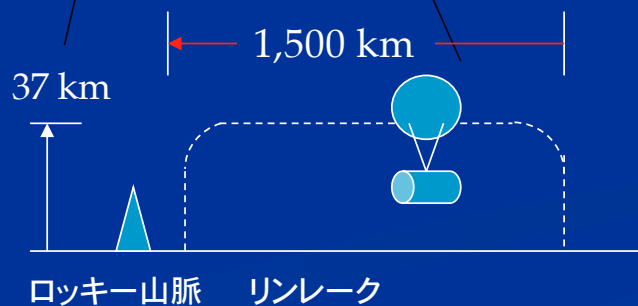


磁極近くの上空(気球)で宇宙線を観測する

- 低エネルギー粒子が地球に降り注ぐ、磁極近くでの観測が有効



大気の影響を受けにくい
上空(>30 km)での観測



Progress of BESS Experiment

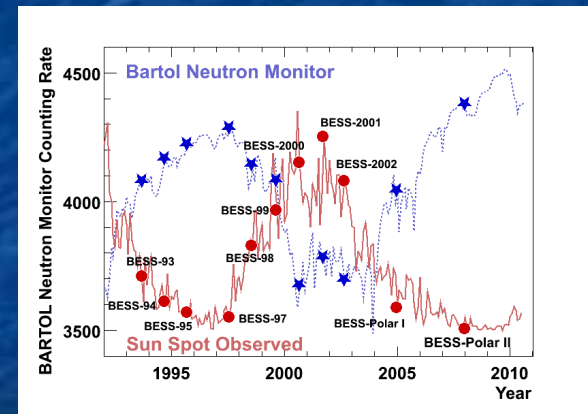
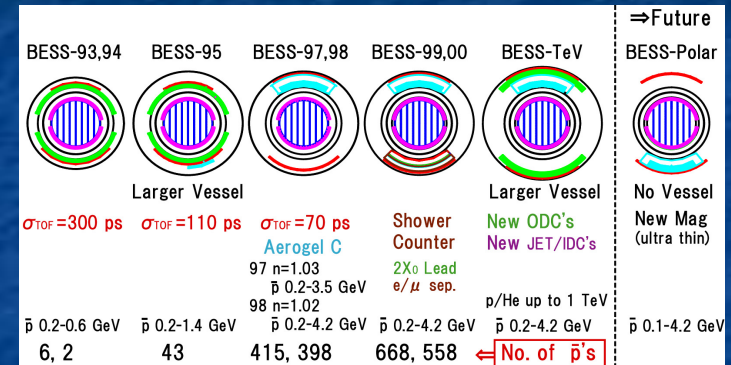
11 scientific balloon flights over Canada and over Antarctica



カナダ



南極



太陽活動の極小期の観測が効果的

BESS Polar-II history

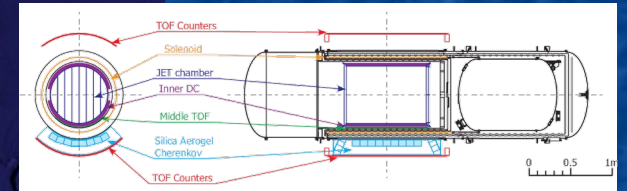
2005年1月より本格始動



NASA/
ゴダード宇宙航空センター
(2007.01 - 2007.07)

10000km

開発・組み立て



南極・マクマード基地へ

マクマード基地

- 標準時: ニュージーランド時間
- NZ⇔2,3便/day
- フライト時間: 6~8hour

貨物機内部は強烈な騒音

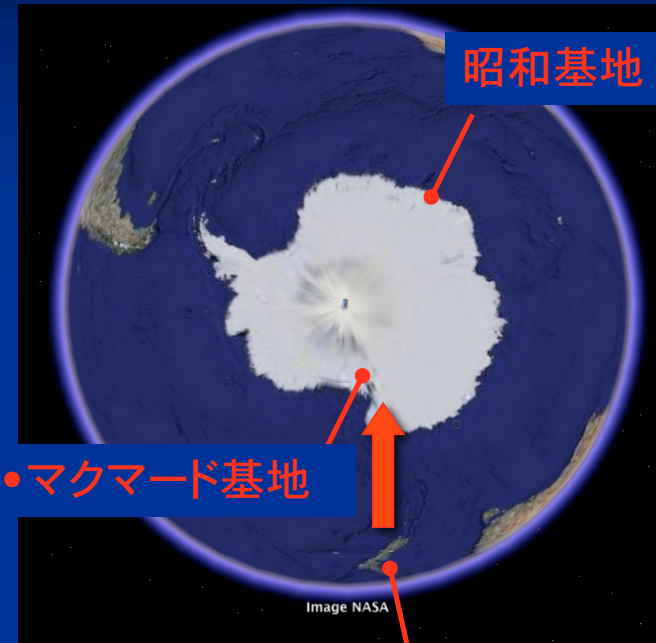


BESSコンテナ

NZ⇒米マクマード基地



A. Yamamoto, 2022/9/7

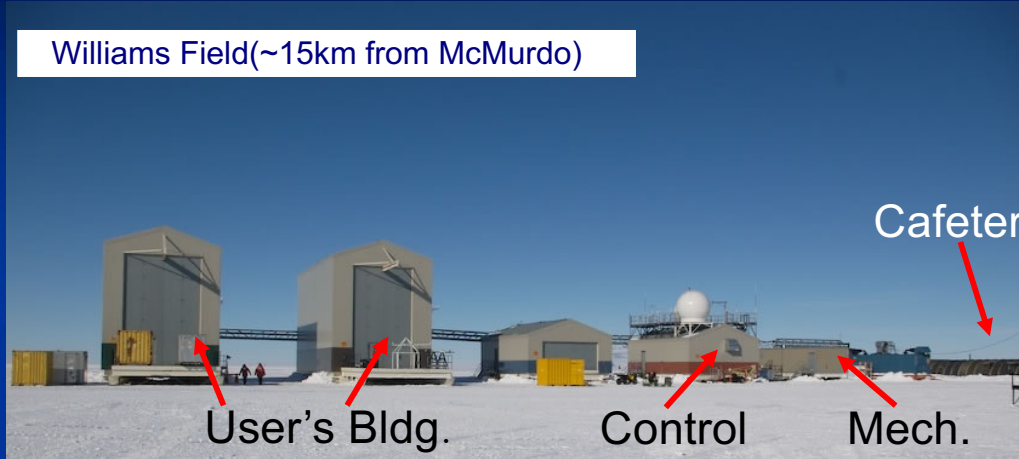


氷原を整地して滑走路にしている。



フライト準備@南極

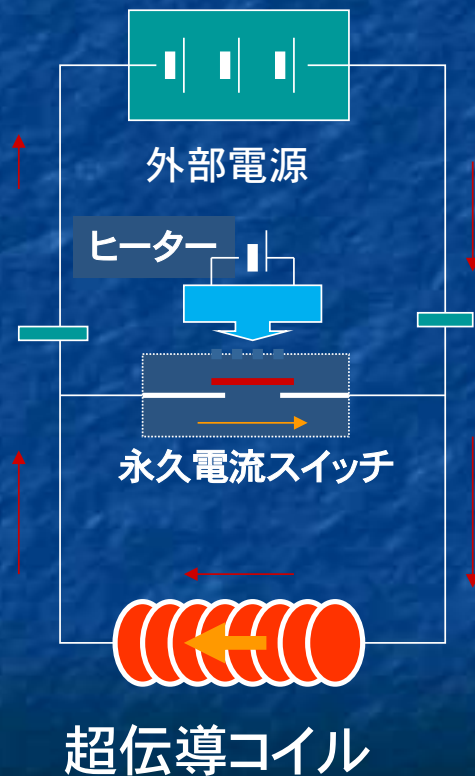
Williams Field(~15km from McMurdo)



A. Yamamoto, 2022/9/7

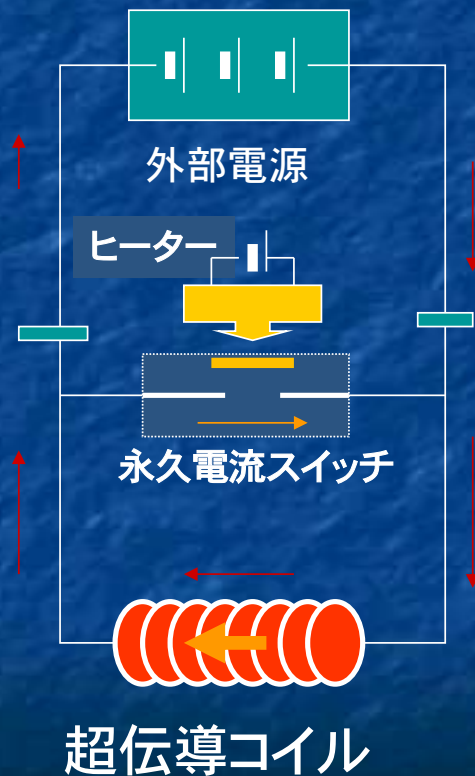
観測システムの組み上げ

永久電流の実現



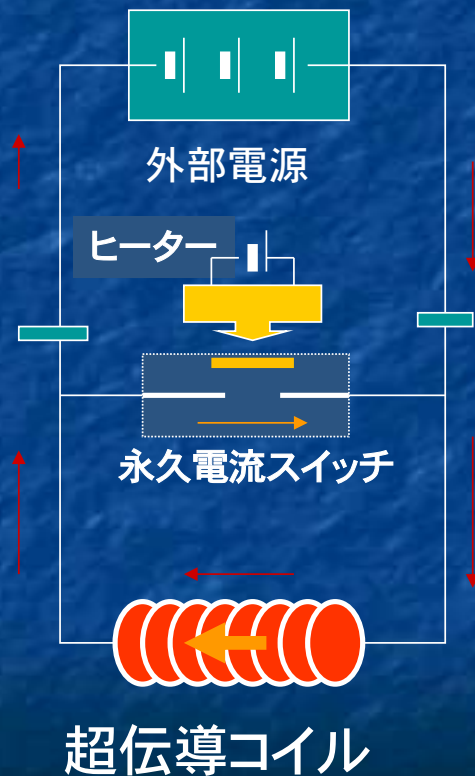
- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- ↓
- 外部から電流を供給して充電
- ↓
- ヒータをオフして、超伝導ループを形成
- ↓
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
- ↓
- 永久電流磁場の達成

永久電流の実現



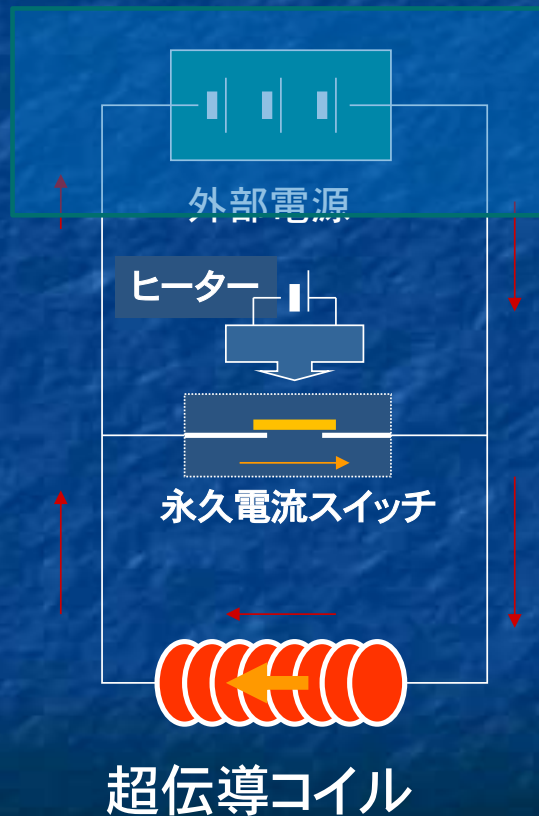
- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- ↓
- 外部から電流を供給して充電
- ↓
- ヒータをオフして、超伝導ループを形成
- ↓
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
- ↓
- 永久電流磁場の達成

永久電流の実現



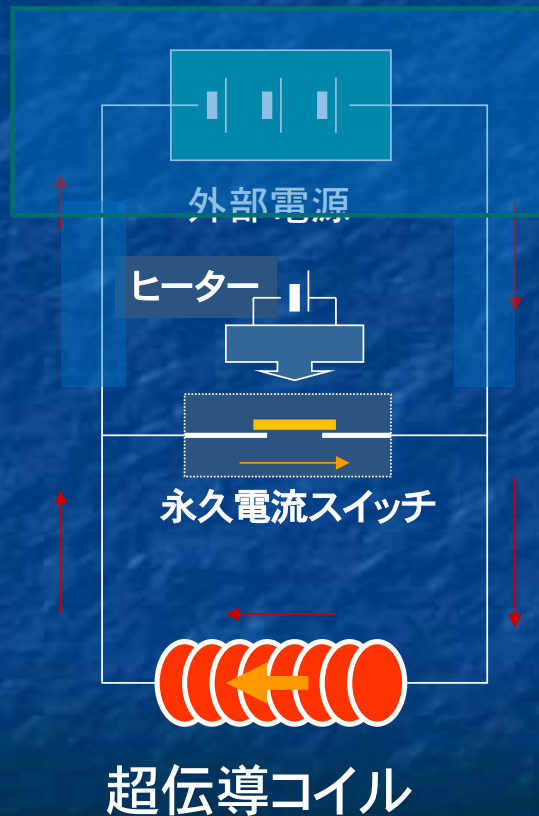
- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- ↓
- 外部から電流を供給して充電
- ↓
- ヒーターをオフして、超伝導ループを形成
- ↓
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
- ↓
- 永久電流磁場の達成

永久電流の実現



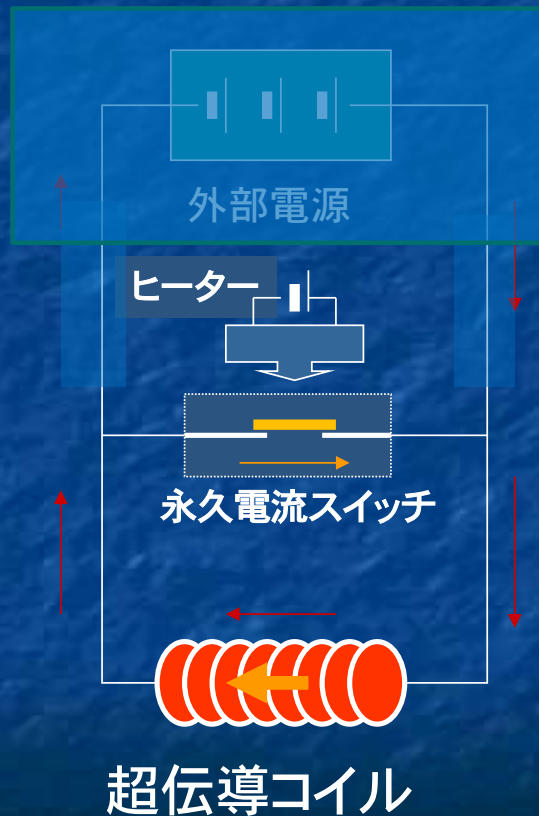
- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- 外部から電流を供給して充電
- ヒーターをオフして、超伝導ループを形成
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
- 永久電流磁場の達成

永久電流の実現



- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- ↓
- 外部から電流を供給して充電
- ↓
- ヒータをオフして、超伝導ループを形成
- ↓
- 外部からの電流をオフ、**電源切り離し**
- ↓
- **永久電流磁場の達成**

永久電流の実現



- ヒーターを炊いて、超伝導ループを遮断
- ↓
- 外部から電流を供給して充電
- ↓
- ヒータをオフして、超伝導ループを形成
- ↓
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
- ↓
- **永久電流磁場の達成**

BESS Polar-II Launch

建物からロールアウト



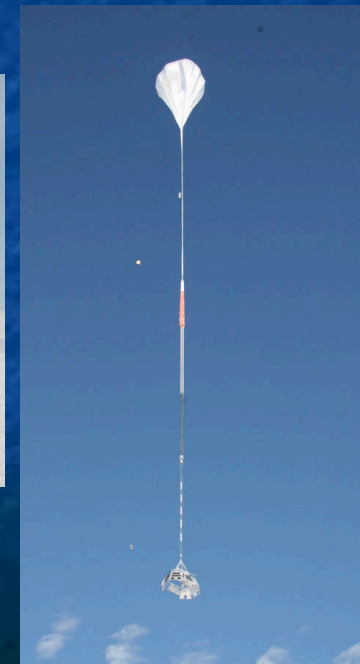
放球場への移動



南極フライト・打ち上げ

- Movie

BESS-Polar II Launch - December 22, 2007

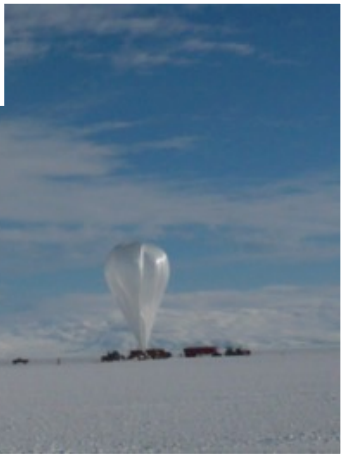


Scientific Ballooning of BESS Detector at Antarctica

- for Cosmic-Ray Observation -

Williams Field,McMurdo,
in Antarctica
12/23 2007

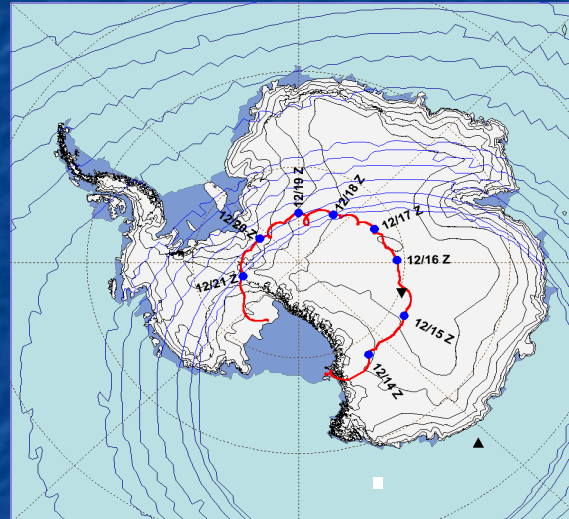
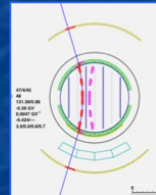
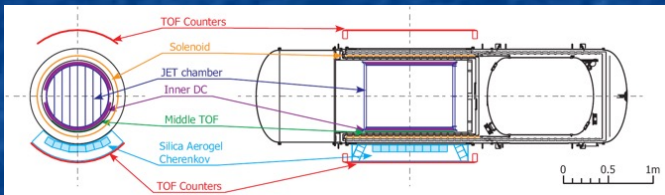
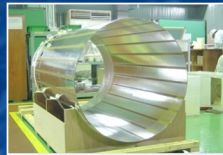
Movie



A. Yamamoto 2022/9/7

BESS-Polar Long Duration Balloon Flights over ANtarctica

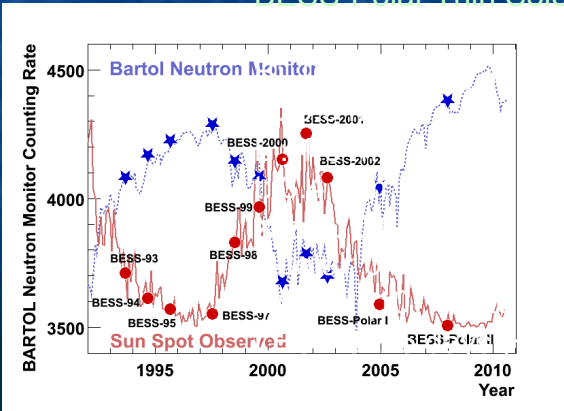
- New Spectrometer with a ultra thin solenoid, with solar power system



BESS-Polar Thin Solenoid

First Flight 2004.12.13-22

Second Flight 2007.12.23-1.21



A. Yamamoto, 2022/9/7

	BESS-Polar I	BESS-Polar II
Launch date	Dec. 13 th , 2004	Dec. 23 rd , 2007
Observation time	8.5 days	24.5 days
Cosmic-ray observed	9×10^8 events	4.7×10^9 events
Flight altitude	37~39km (5~4g/cm ²)	~36km (6~5g/cm ²)

End of BESS-Polar II Flight



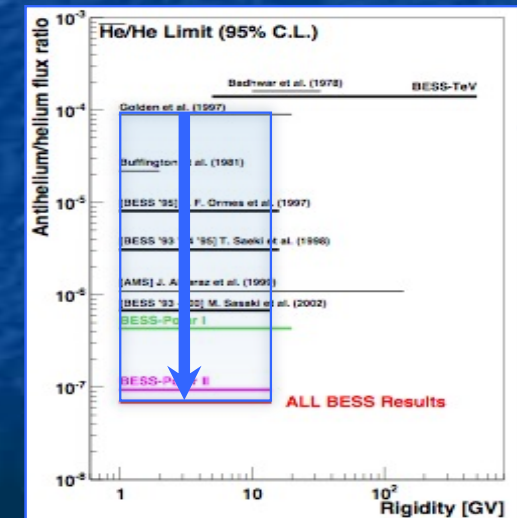
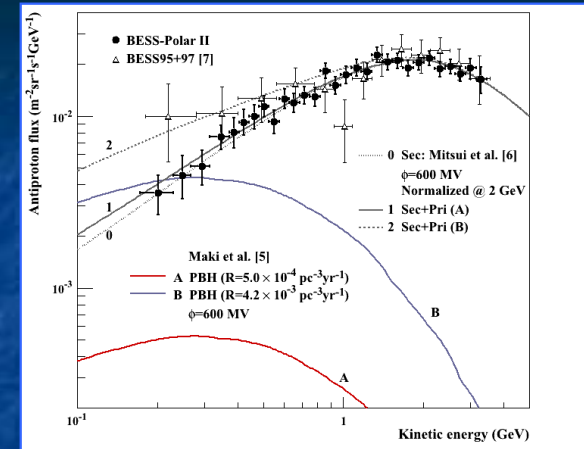
- Flight termination January 20, 2008 ~30 days
- Location $83^{\circ} 51.23' S, 73^{\circ} 5.47' W$
- On West Antarctic ice sheet - 225 nm from Patriot Hills Camp, 185 nm from AGO-2, 357 nm from South Pole
- Data successfully recovered February 3, 2008!

BESS-Polar II Recovery

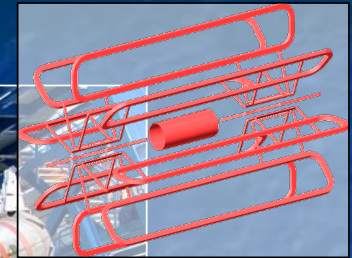
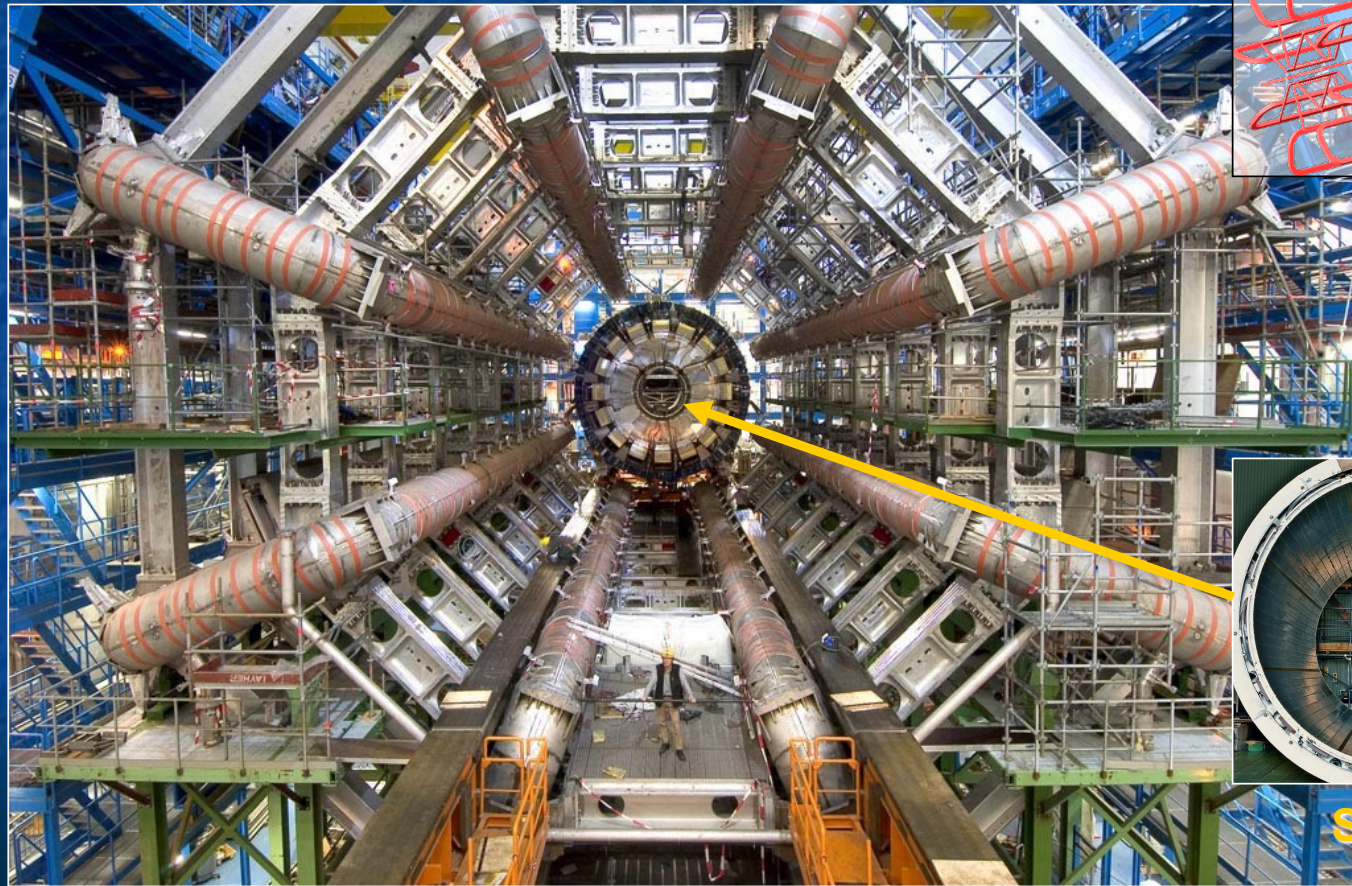


BESS による達成

- ビッグバン宇宙の痕跡を探る
 - 宇宙線反粒子をプローブとしてミニブラックホールの痕跡を探る。
 - 反物質の探索を通して、物質／反物質の非対称性を探る。
- 宇宙起源反粒子、反物質の探索
 - 超伝導スペクトロメータにより精密な質量同定・高感度を実現
 - 太陽活動の極小期(2007~8)に南極周回観測を実験。
 - 宇宙線反陽子の多くは衝突起源(二次的な粒子)
 - 宇宙反物質の探索: 上限比 10^{-8} に迫る探索(探索感度を3桁深める)
- TOPAZ → BESS-Polar で開発された技術 → LHC-ATLAS への展開
 - 加速器科学 → 宇宙観測への応用 → 加速器科学への再応用



LHC: ATLAS Central Solenoid using the same technology



アウトライン

- はじめに
- 加速器における応用
 - 超伝導(電)磁石・
 - 超伝導高周波加速空洞
- 粒子検出器における応用
 - 透明な磁石、応用の広がり

 - 夜話トピックス—宇宙観測への超伝導技術応用:
 - 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索」
- **未来への夢**

超伝導・高エネルギー加速器の将来

Linear Colliders:

ILC e+e- (250 GeV → 1 TeV) :

- SRF: for High-Q (10^{10}) and high-G (31.5 MV/m)
- Highest efficiency and AC-power balance

CLIC e+e- (380 GeV → 3 TeV) :

- NRF: Very high G (100 MV/m) for energy frontier with compactness

Circular Colliders :

FCC-e+e- (90 → 350 GeV):

- SRF: with staging for efficient energy extension
 - Synchrotron radiation (SR) to determine the energy
- Highest luminosity at Z and H,

FCC-pp (2 x 50 TeV):

- High-field SC magnets (SCM: 16 T) for energy frontier
- SRF: for acceleration for good energy balance w/ SR

CEPC e+e- (2 x 120 GeV):

- SRF: for acceleration,
 - Synchrotron radiation to determine the energy

SPPC- pp (75 TeV):

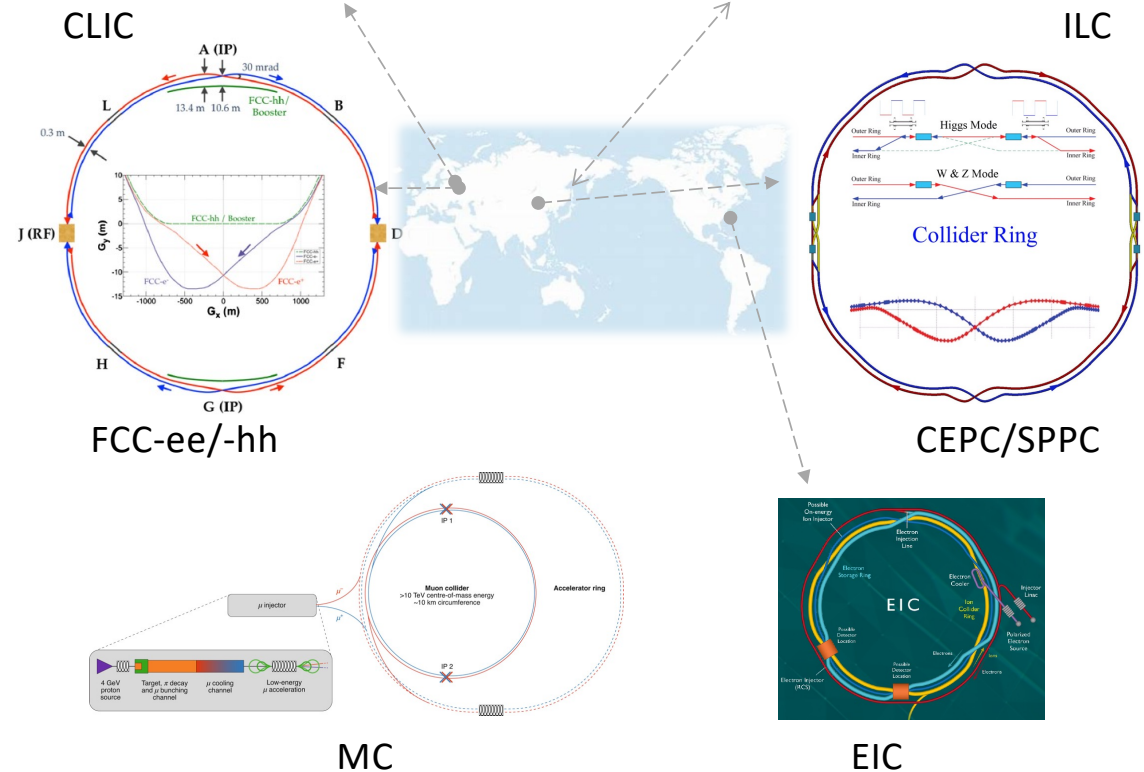
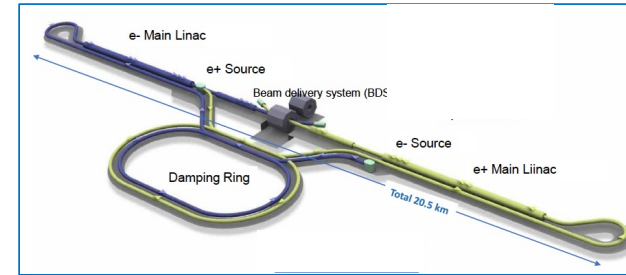
- High-field SCM (12 T) for energy frontier
- SRF: beam acceleration

(EIC Ion•e-(275/100 GeV/n v.s. 18 GeV, under constr.)

- SCM and SRF

MC $\mu+\mu-$ (3 – 14 TeV)

- SRF and NRF with very high-field SCM
- Higher efficiency at > 3 TeV, although short life-time.



未来への願い・夢

- 全世界的な規模で加速器将来計画に向けた技術開発が進められている。超伝導技術は、その実現を先導する要となる。超伝導技術がさらに発展し、社会・産業貢献への道を切り拓くことを願っている。
- 「科学技術・教育・文化」はこれからの日本が担うべき国際的な大きな役割。高エネルギー加速器、粒子物理学の分野には、それを牽引し推進するポテンシャルがある。超伝導技術はその要となる。
- 欧州原子核研究機構(CERN)の設立理念「Science for Peace(平和のための科学)」に学び、日本に先端基礎科学・先端技術の開拓を担う国際研究機関の実現を「未来への夢」とし、次世代へと引き継ぎたい。

感謝

日本における粒子加速器・超伝導技術応用の道を切り拓かれ、私達をご指導くださった「平林洋美先生」、「小島融三先生」に心より感謝を捧げます。

私が素粒子物理、加速器における超伝導技術開発・応用に取り組みを続けた半世紀、多くの研究者、技術者、企業の皆様からのご指導、協力に感謝致します。

そして、次世代を担う皆様に、「未来への夢」を託します。

