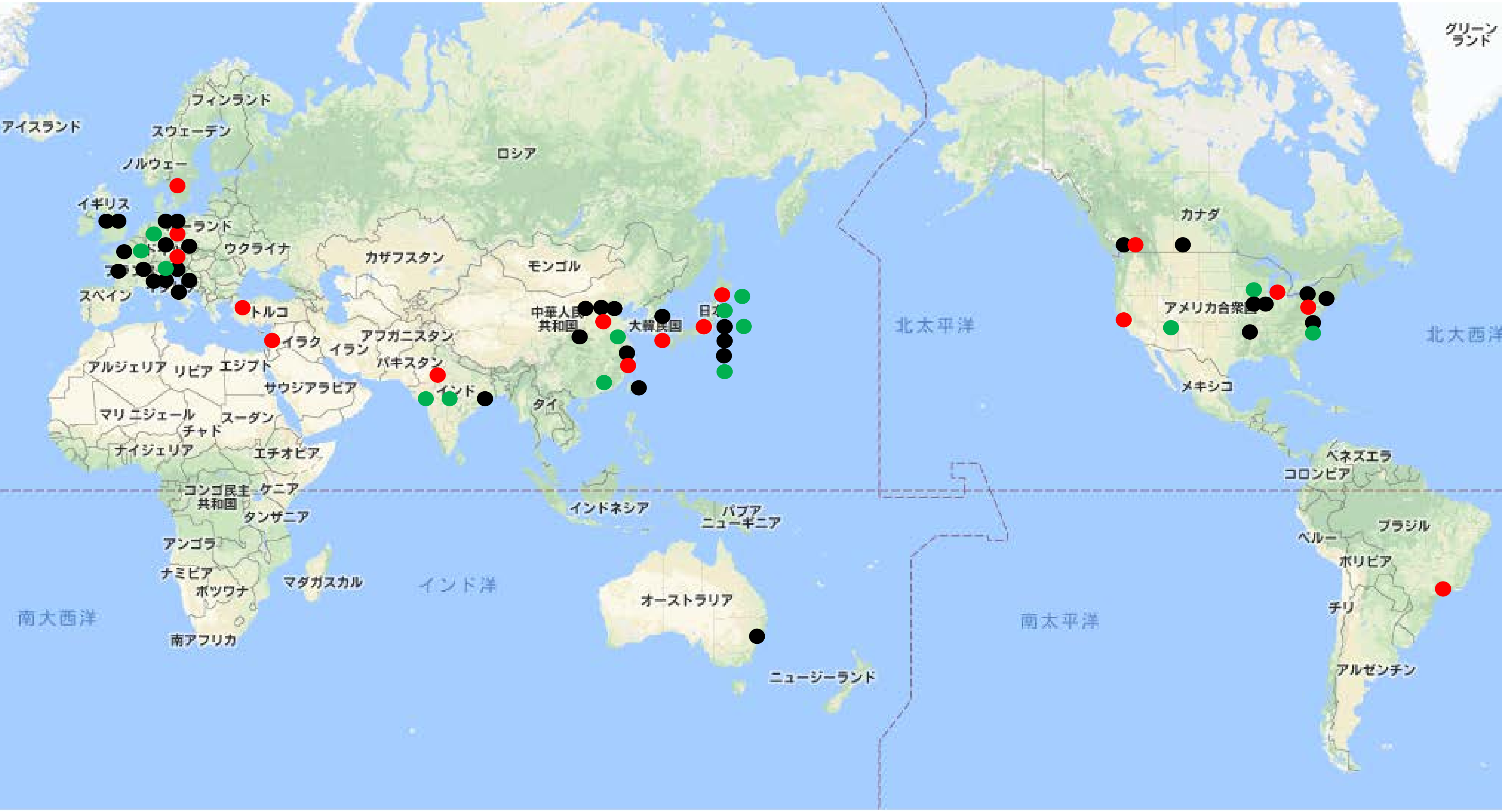
世界で幅広く展開する超伝導加速器の現状と将来

加古　永治

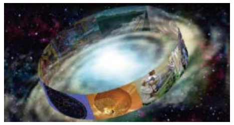
高エネルギー加速器研究機構

2018, October 10

世界で幅広く展開する超伝導加速器　（1）

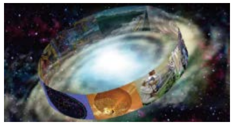

グリーンランド
フィンランド
アイスランド
スウェーデン
ノルウェー
ロシア
イギリス
ウクライナ
カザフスタン
モンゴル
スペイン
トルコ
イラク
イラン
アフガニスタン
パキスタン
中華人民共和国
大韓民国
日本
インド
タイ
アルジェリア
リビア
エジプト
サウジアラビア
マリ
ニジェール
チャド
スーダン
ナイジェリア
エチオピア
コンゴ民主共和国
ケニア
タンザニア
アンゴラ
ナミビア
ボツワナ
マダガスカル
南アフリカ
南大西洋
インド洋
インドネシア
パプアニューギニア
オーストラリア
ニュージーランド
北太平洋
南太平洋
カナダ
アメリカ合衆国
メキシコ
北大西洋
ベネズエラ
コロンビア
ブラジル
ペルー
ボリビア
チリ
アルゼンチン

● **Operation**　● **Construction**　● **Future Plan**



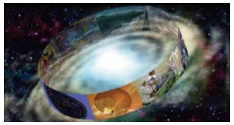
世界で幅広く展開する超伝導加速器　（2）

- 素粒子実験用衝突型円形加速器　(S-KEKB, BEPC, LHC, CEPC, FCC)
- 放射光源用円形加速器　(DIAMOND, CLS, TPS, SLS, PLS, NSLS-II)
- 原子核科学実験用電子線形加速器　(CEBAF)
- 自由電子レーザー用線形加速器　(FLASH, E-XFEL, LCLS-II, S-XFEL)
- エネルギー回収型線形加速器　(cERL, bERLinPro, CBETA, PERLE)
- 中性子源・核破砕用陽子加速器　(SNS, ESS, CiADS, MIRRHA, J-ADS)
- ニュートリノ実験用大強度陽子加速器　(PIP-II, HIPrDr-KEK)
- 核融合材料試験用重陽子加速器　(IFMIF-LIPAc, A-FNS, DONES)
- 原子核実験用重イオン加速器　(ISAC-II, SPIRAL-2, RILAC, FRIB, RAON)
- 高エネルギー実験用衝突型線形加速器　(STF, FAST, ILC)

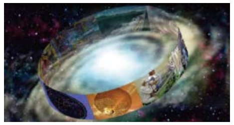


本日の発表内容

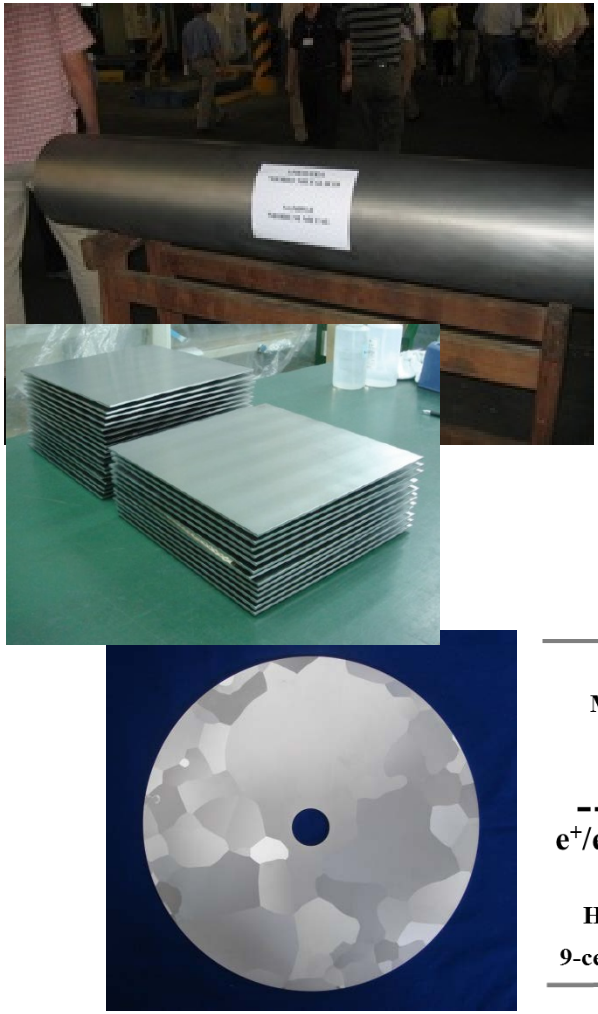
- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに



- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに

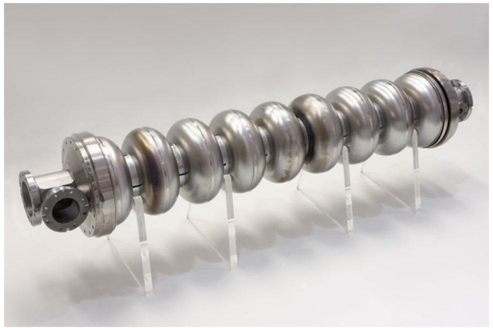


超伝導高周波加速空洞システム (SRF Cavity)

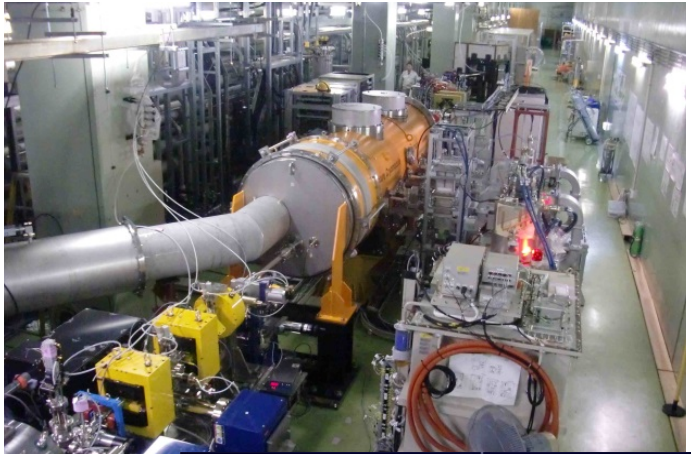


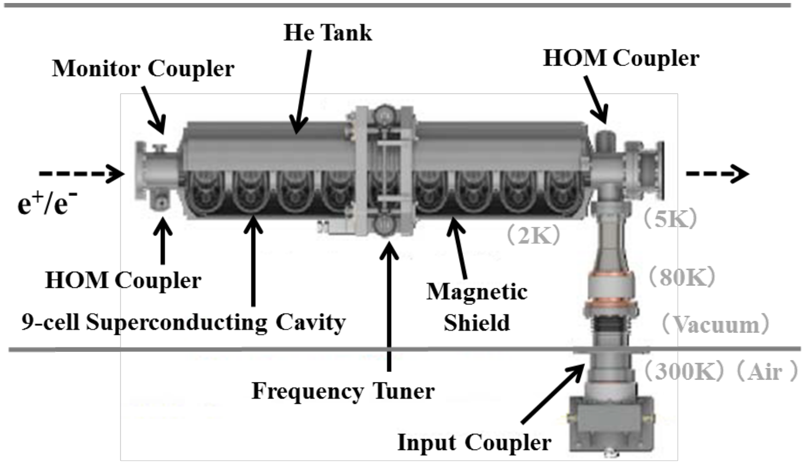
Niobium Material

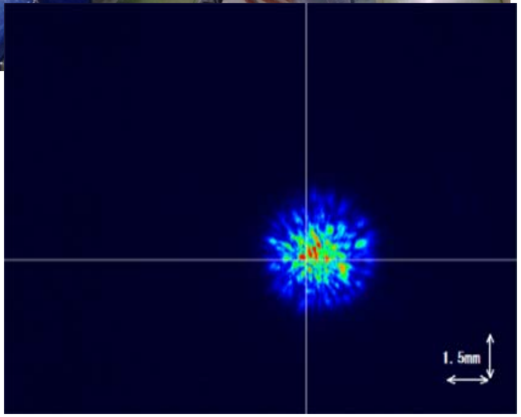
Cavity



Cryomodule

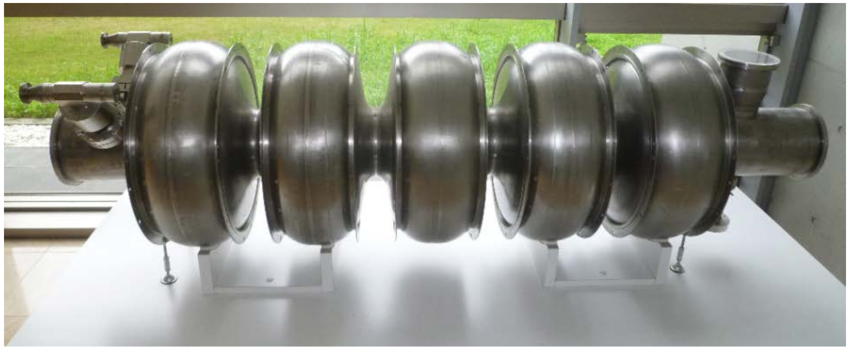



He Tank
Monitor Coupler
HOM Coupler
e+/e-
(5K)
(2K)
HOM Coupler
9-cell Superconducting Cavity
Magnetic Shield
(80K)
(Vacuum)
(300K) (Air)
Frequency Tuner
Input Coupler

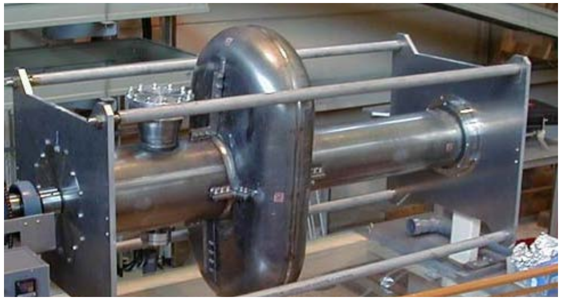


Stable Beam Operation

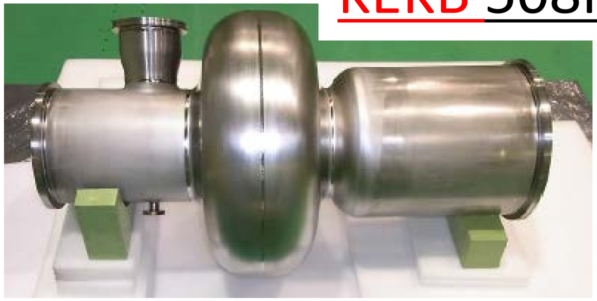
これまでにKEKで開発された超伝導空洞



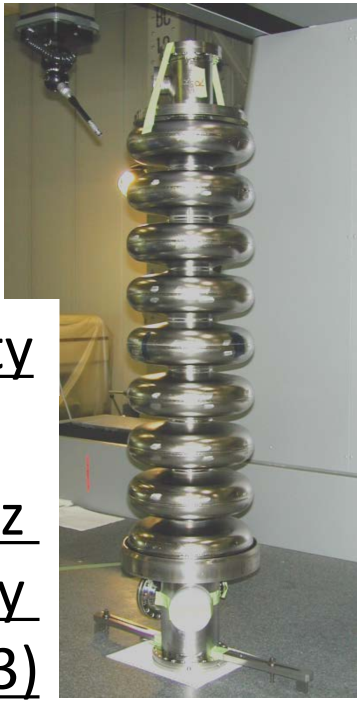
TRISTAN
508MHz 5-cell Cavity



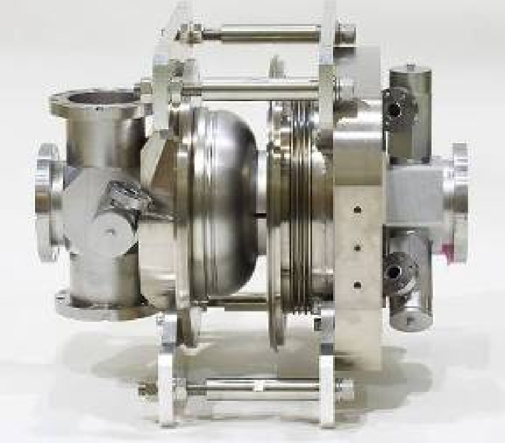
KEKB 508MHz Crab Cavity



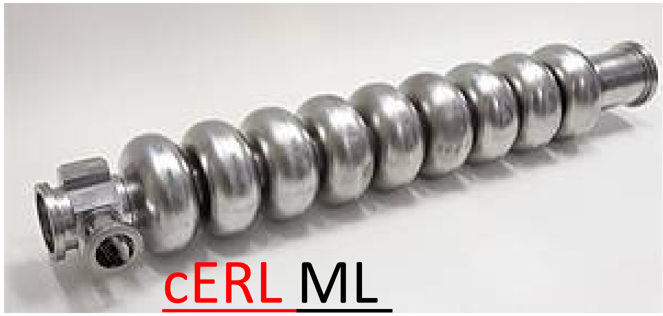
KEKB 508MHz 1-cell Cavity



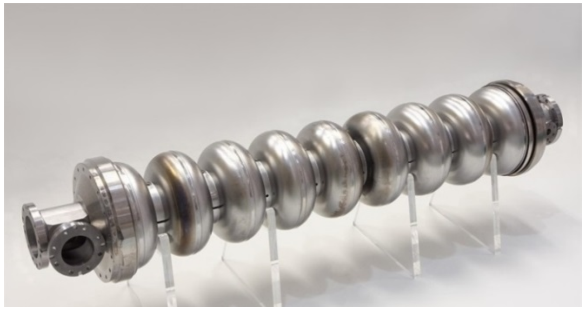
J-ADS 972MHz
9-cell Cavity
(β=0.73)



cERL Injector
1.3GHz 2-cell Cavity

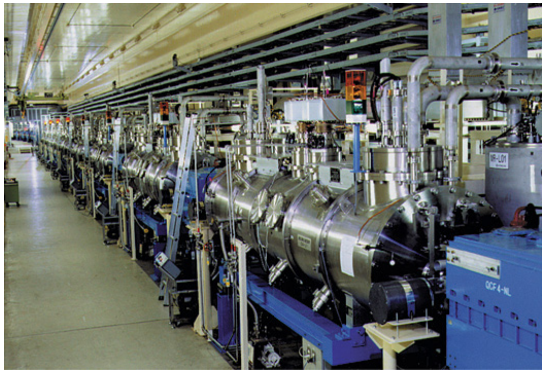


cERL ML
1.3GHz 9-cell Cavity



STF 1.3GHz 9-cell Cavity

これまでにKEKで開発されたクライオモジュール



TRISTAN
508MHz Cryomodule

KEKB
508MHz Cryomoudle

KEKB Crab Cryomoudle

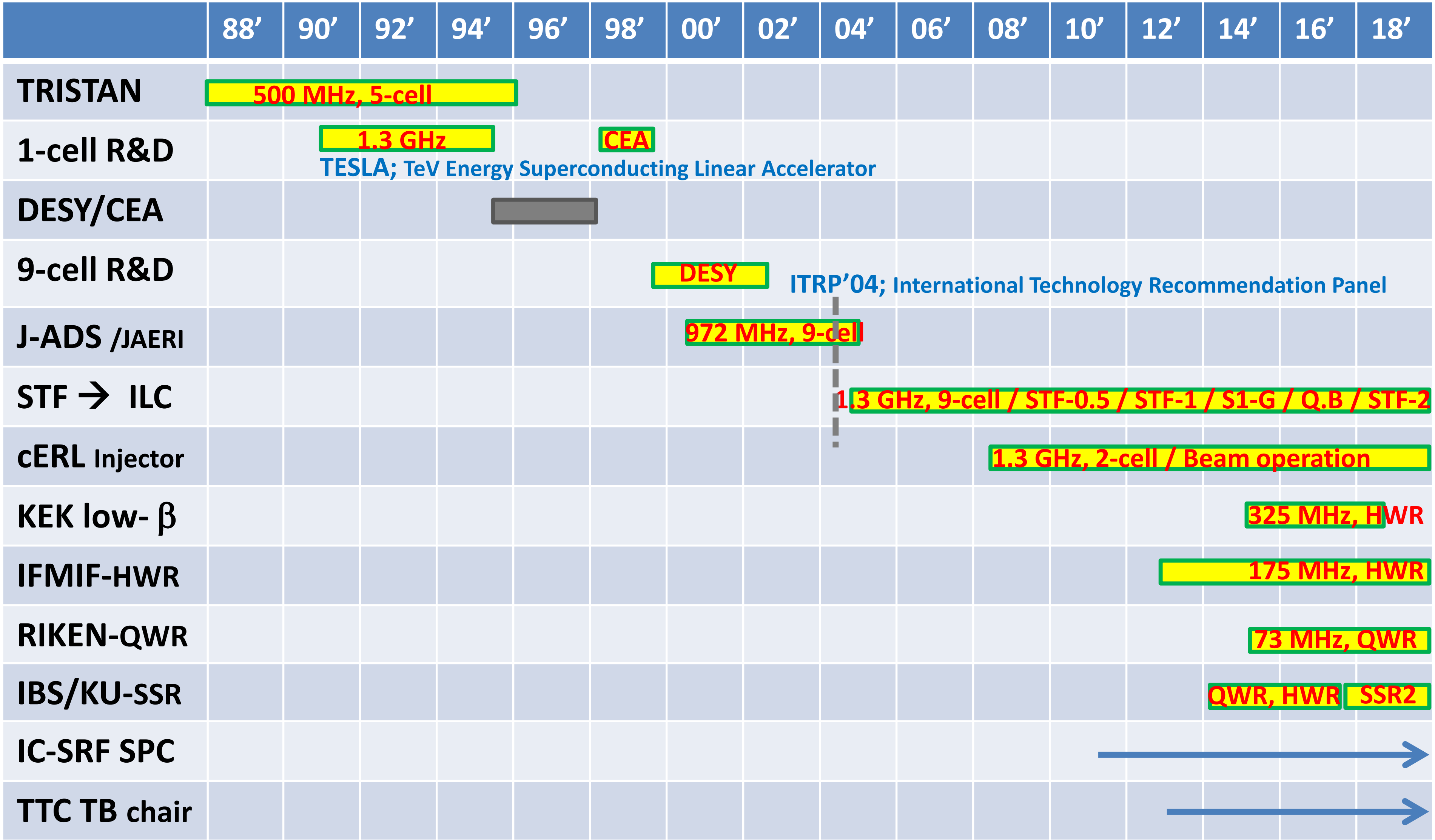
J-ADS 972MHz Cryomodule

cERL 1.3 GHz
Injector Cryomodule

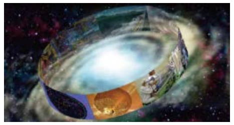
cERL 1.3 GHz
ML Cryomodule

STF 1.3GHz Cryomodule

加古に関する超伝導空洞開発の履歴

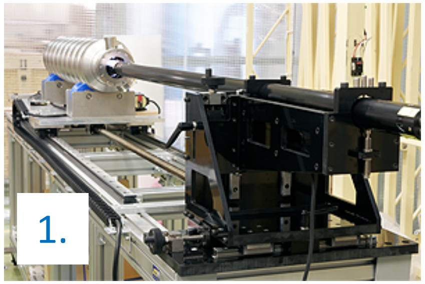


	88’	90’	92’	94’	96’	98’	00’	02’	04’	06’	08’	10’	12’	14’	16’	18’
TRISTAN	500 MHz, 5-cell															
1-cell R&D		1.3 GHz TESLA; TeV Energy Superconducting Linear Accelerator				CEA										
DESY/CEA				▬												
9-cell R&D						DESY			ITRP’04; International Technology Recommendation Panel							
J-ADS /JAERI							972 MHz, 9-cell									
STF → ILC									1.3 GHz, 9-cell / STF-0.5 / STF-1 / S1-G / Q.B / STF-2							
cERL Injector											1.3 GHz, 2-cell / Beam operation					
KEK low- β														325 MHz, HWR		
IFMIF-HWR													175 MHz, HWR			
RIKEN-QWR														73 MHz, QWR		
IBS/KU-SSR														QWR, HWR		SSR2
IC-SRF SPC												→				
TTC TB chair													→			

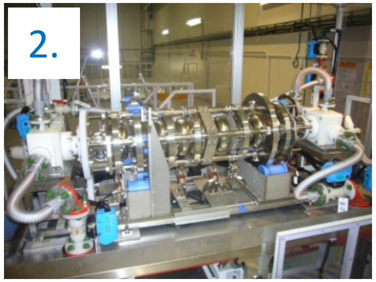


高加速電界達成のための標準的な表面処理技術

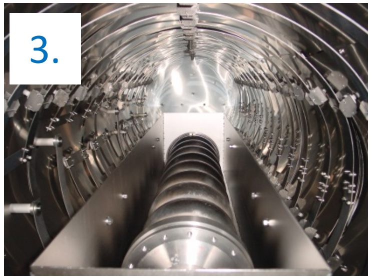
0. Cavity Fabrication


1.

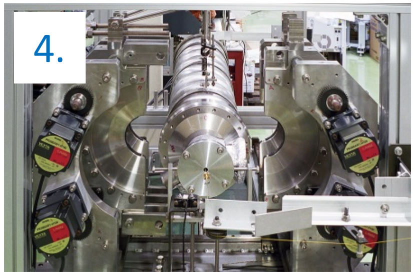
Inspection of inner surface


2.

Pre-EP + EP-I (5+100 μm)

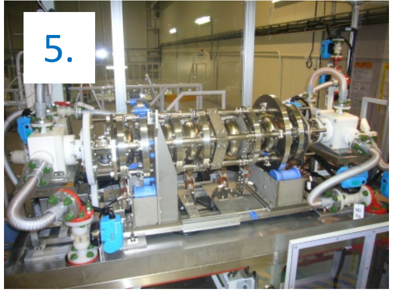

3.

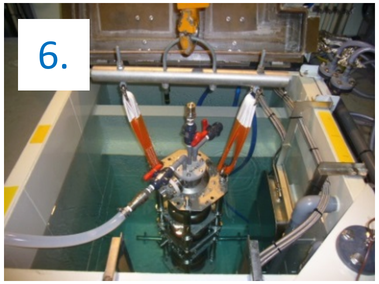
Anneal (750°C, 3h)


4.

Pre-tuning (flatness, f_0)

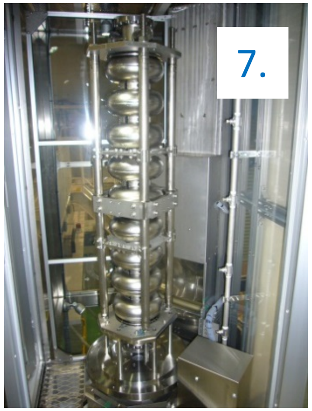
EP-II (5~20 μm)


5.

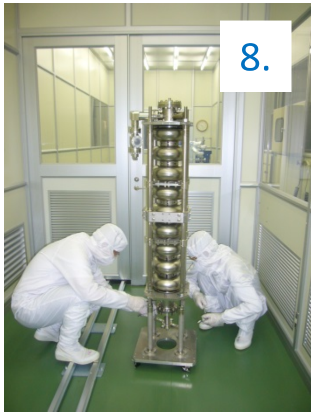

6.

Hot bath rinsing with ultra-sonic

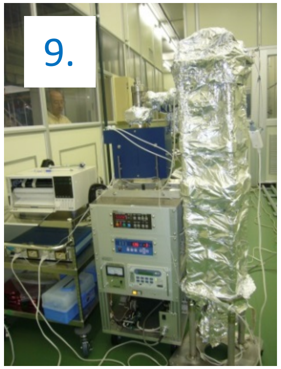
EP: 電解研磨
HPR: 高圧水洗浄


7.

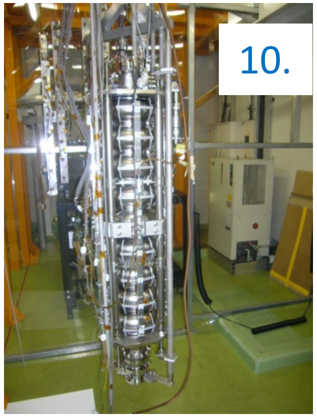
HPR


8.

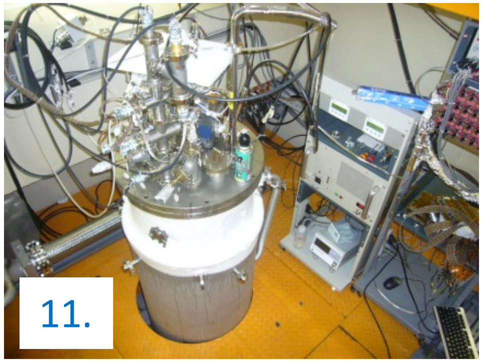
Assembly (**Class 10**)


9.

Baking (120°C, 48h)
(Class 1000)

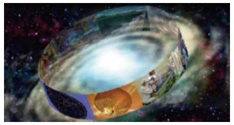

10.

Hanging stand with T-map

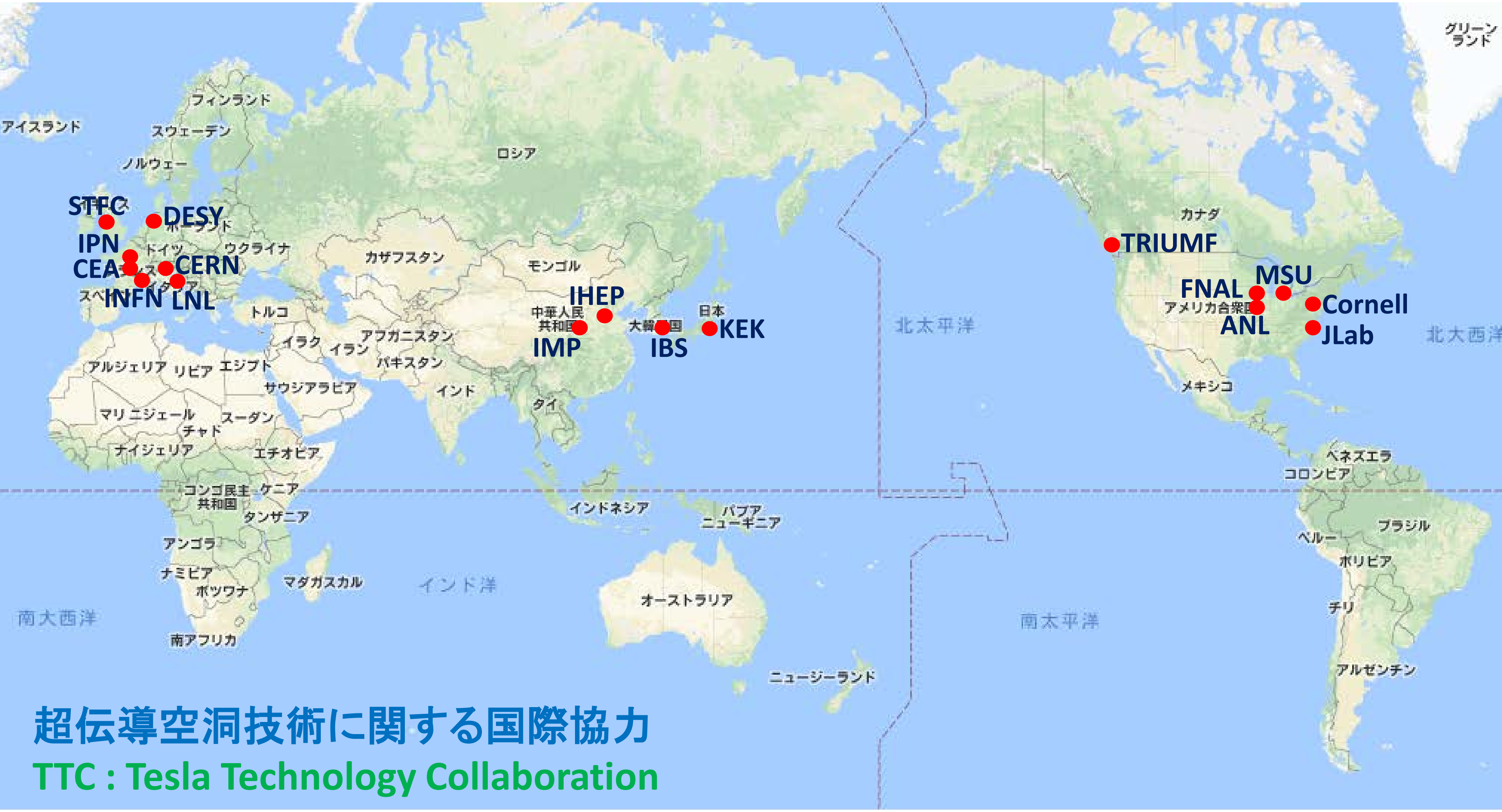

11.

Vertical Test

12. Cryomodule Assembly



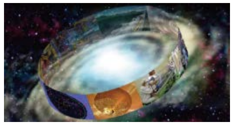
超伝導空洞のR&Dを行っている世界の研究施設


STFC
DESY
IPN
CEA
CERN
INFN
LNL
IHEP
IMP
IBS
KEK
TRIUMF
FNAL
MSU
ANL
Cornell
JLab
アイスランド
フィンランド
スウェーデン
ノルウェー
ロシア
ポーランド
ドイツ
ウクライナ
カザフスタン
モンゴル
中華人民共和国
大韓民国
日本
トルコ
イラク
イラン
アフガニスタン
パキスタン
インド
タイ
アルジェリア
リビア
エジプト
サウジアラビア
マリ
ニジェール
チャド
スーダン
ナイジェリア
エチオピア
コンゴ民主共和国
ケニア
タンザニア
アンゴラ
ナミビア
ボツワナ
マダガスカル
南アフリカ
インドネシア
パプアニューギニア
オーストラリア
ニュージーランド
インド洋
南大西洋
北太平洋
南太平洋
北大西洋
グリーンランド
カナダ
アメリカ合衆国
メキシコ
ベネズエラ
コロンビア
ブラジル
ペルー
ボリビア
チリ
アルゼンチン

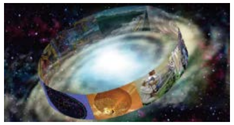
超伝導空洞技術に関する国際協力

TTC : Tesla Technology Collaboration

● 液体He冷凍設備 ● 表面処理設備 ● 真空熱処理炉 ● クリーンルーム ● 超純水 ● たて測定

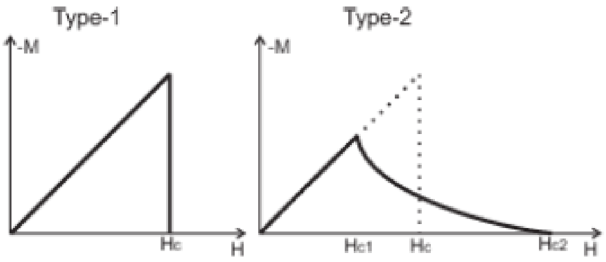


- はじめに
- **超伝導空洞（SRF）とその応用**
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに



超伝導体の一般特性

Type-1, Type-2 Superconductor



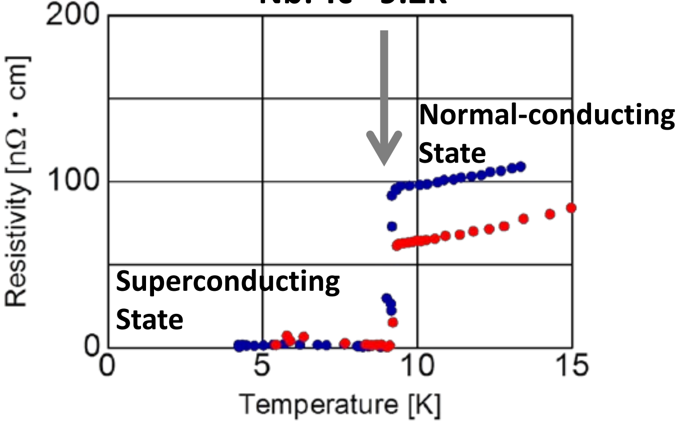
Pb

Nb, Nb3Sn

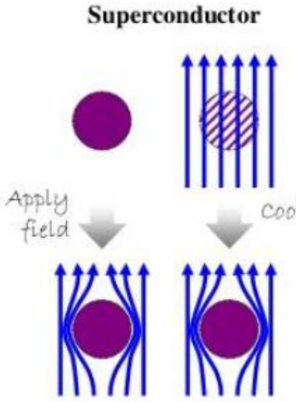
DC Resistivity

$$RRR = \frac{\rho(293K)}{\rho(9.3K)}$$

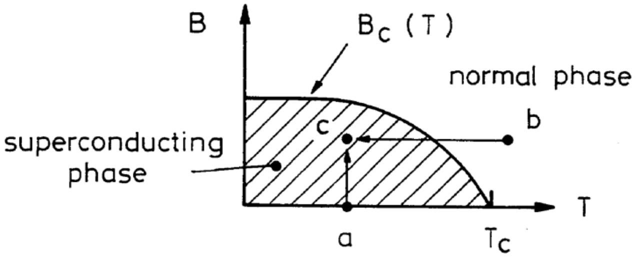
Nb: Tc= 9.2K



Meissner effect


Superconductor
Apply field
Cool

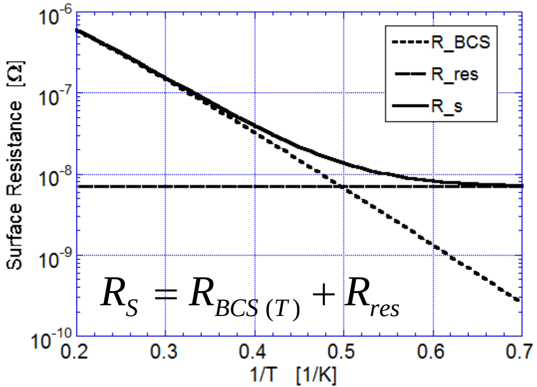
Phase diagram


B
Bc (T)
normal phase
b
c
superconducting phase
a
Tc
T

$H_{c1}(T) = H_{c1}(0) \times (1-(T/T_c)^2)$

T < Tc/2

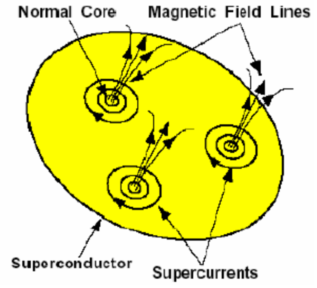
RF Surface Resistance



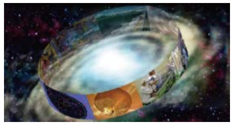
$$R_S = R_{BCS\,(T)} + R_{res}$$

$$R_{BCS} = A\frac{\omega^2}{T}\exp\left(-\frac{\Delta}{k_B \cdot T}\right)$$

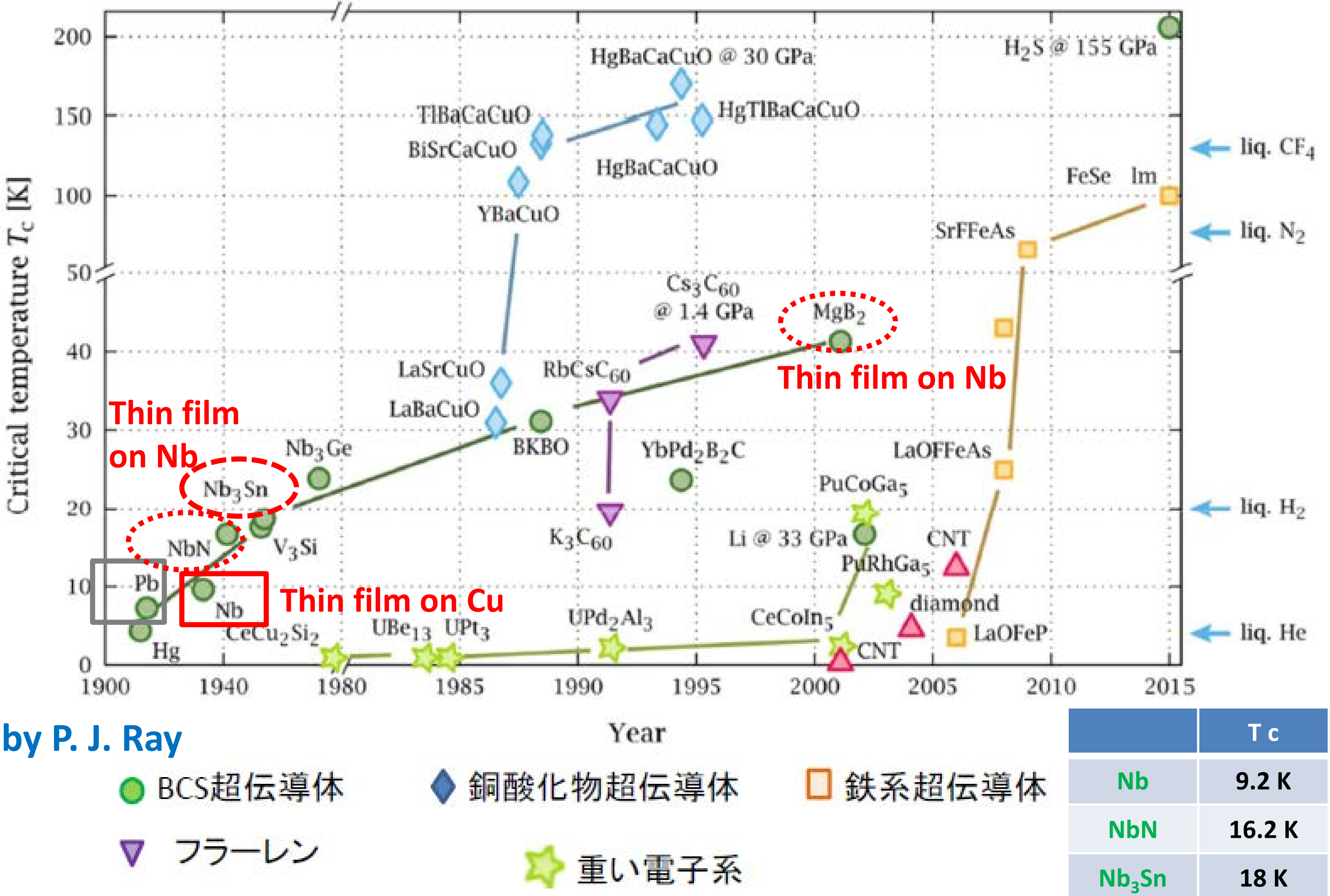
Flux trapping


Normal Core
Magnetic Field Lines
Superconductor
Supercurrents

R_{res} = 0.3~0.4 [nΩ /mG]



超伝導加速空洞（1）



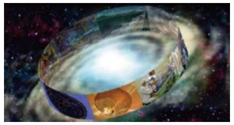
Thin film on Nb

Thin film on Nb

Thin film on Cu

by P. J. Ray

	T c	H c (0)	λ
Nb	9.2 K	0.20 T	40 nm
NbN	16.2 K	0.23 T	~350 nm
Nb_3Sn	18 K	0.54 T	~100 nm
MgB_2	40 K	0.43 T	140 nm

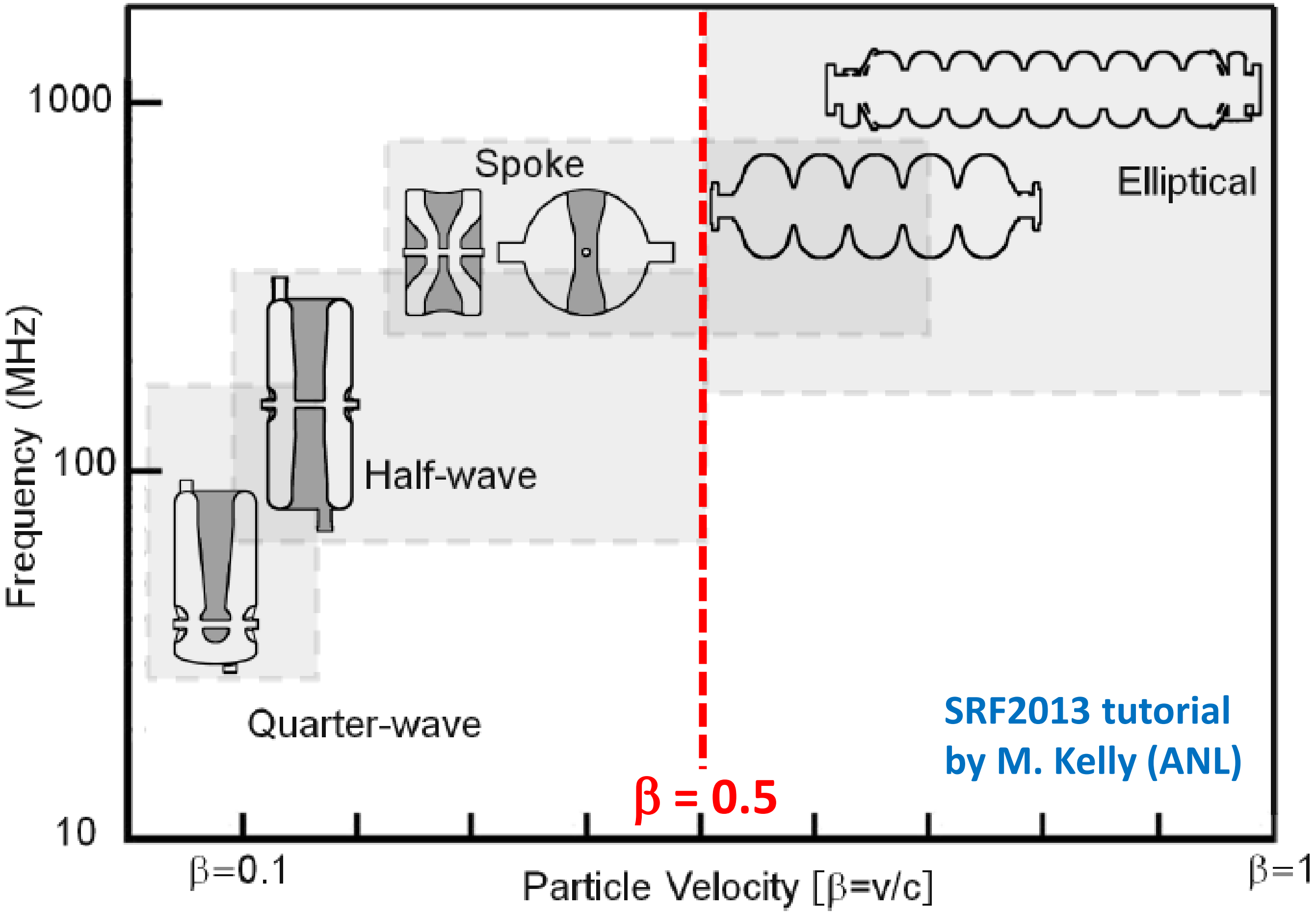


超伝導加速空洞 （2）

Practical Superconducting Cavity Geometries Spanning the Full Range of Velocities

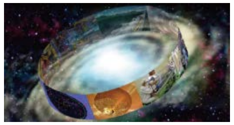
SC RFQ

INFN-LNL

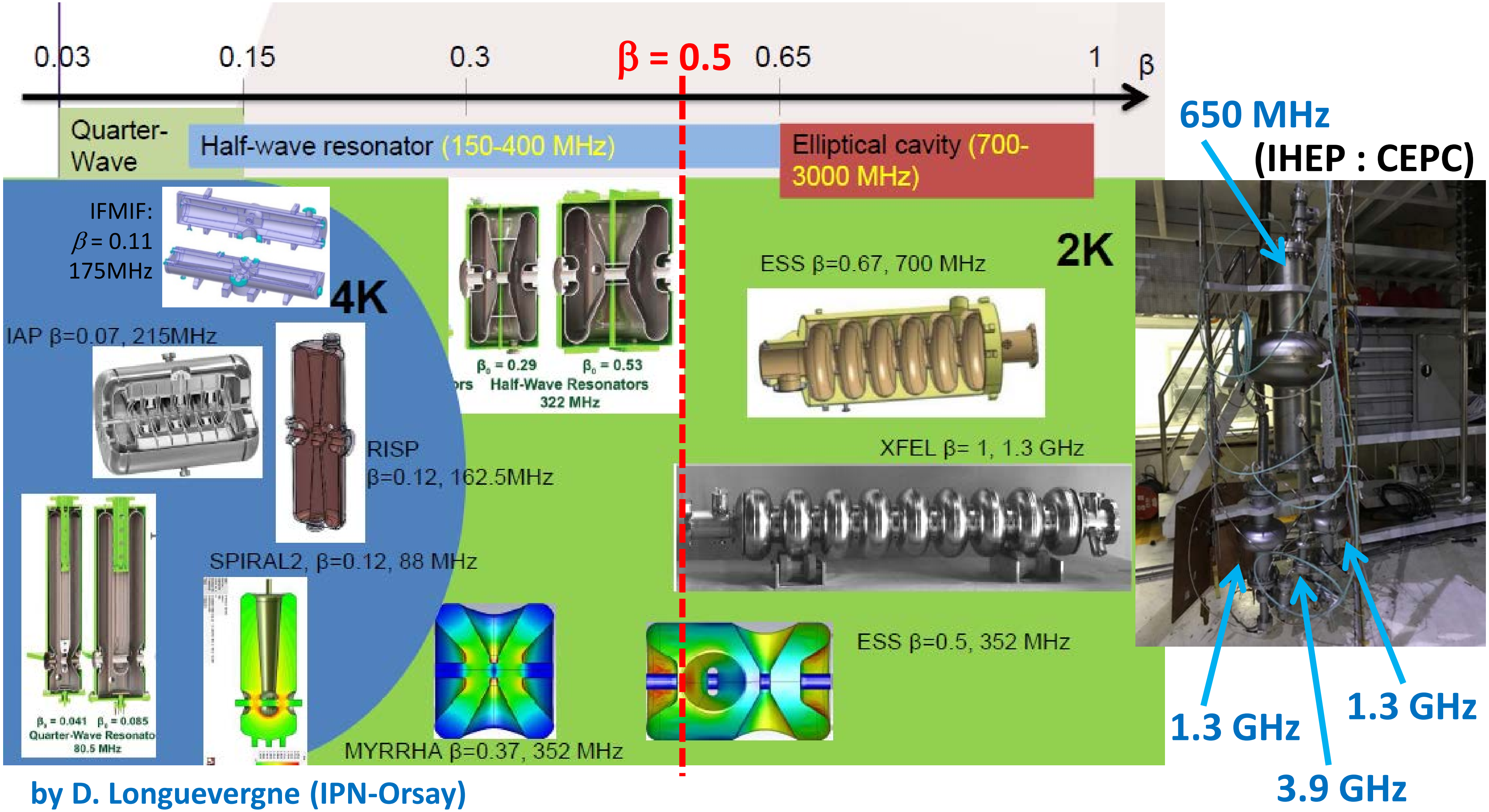


β = 0.5

SRF2013 tutorial by M. Kelly (ANL)



超伝導加速空洞 （3）


0.03
0.15
0.3
β = 0.5
0.65
1
β
Quarter-Wave
Half-wave resonator (150-400 MHz)
Elliptical cavity (700-3000 MHz)
IFMIF: β = 0.11 175MHz
4K
IAP β=0.07, 215MHz
RISP β=0.12, 162.5MHz
βg = 0.041 βg = 0.085 Quarter-Wave Resonato 80.5 MHz
SPIRAL2, β=0.12, 88 MHz
β0 = 0.29 β0 = 0.53
Half-Wave Resonators 322 MHz
MYRRHA β=0.37, 352 MHz
2K
ESS β=0.67, 700 MHz
XFEL β= 1, 1.3 GHz
ESS β=0.5, 352 MHz
650 MHz
(IHEP : CEPC)
1.3 GHz
1.3 GHz
3.9 GHz

by D. Longuevergne (IPN-Orsay)

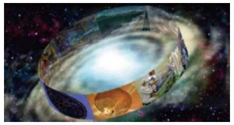
超伝導加速空洞（4）

What is the advantage of superconducting cavities?

- low surface loss → higher Q → higher Ws
- high acceleration gradient

  → higher energy in smaller space
- better efficiency to beam power

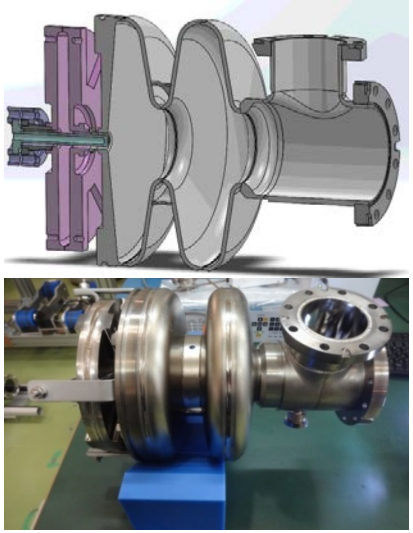
  → smaller RF power source
- CW operation at higher fields



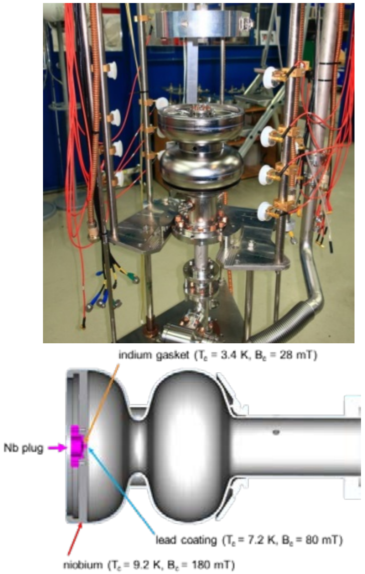
超伝導空洞の応用（1）:　SRF-Gun Cavity

目的:

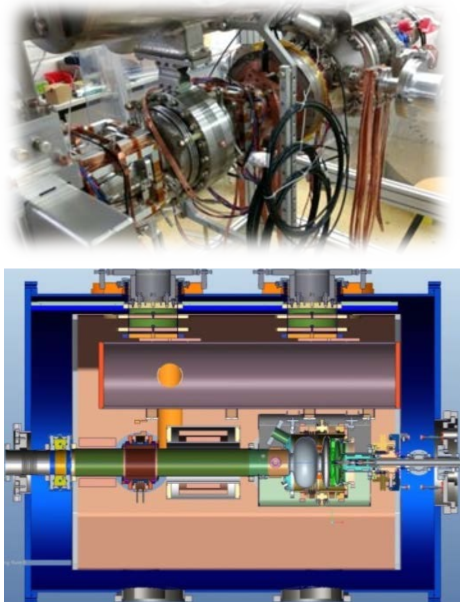
High current, low emittance and high brightness CW electron source



KEK: 1.3 GHz 1.5-cell

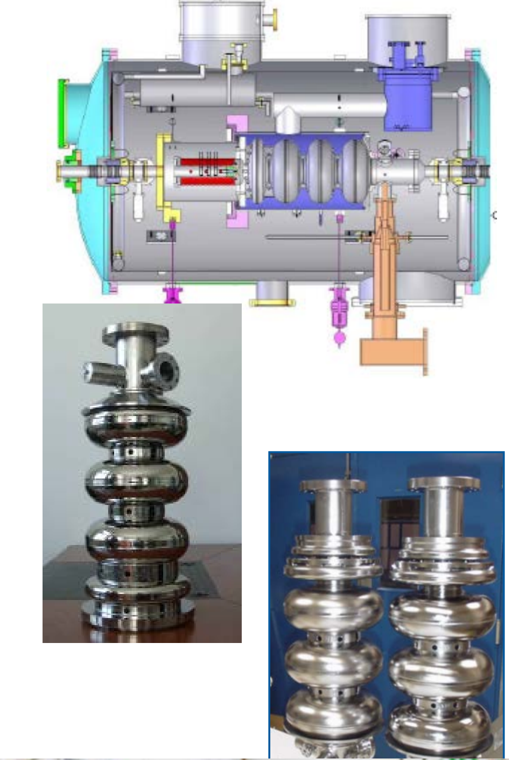

indium gasket (T_c = 3.4 K, B_c = 28 mT)
Nb plug
lead coating (T_c = 7.2 K, B_c = 80 mT)
niobium (T_c = 9.2 K, B_c = 180 mT)

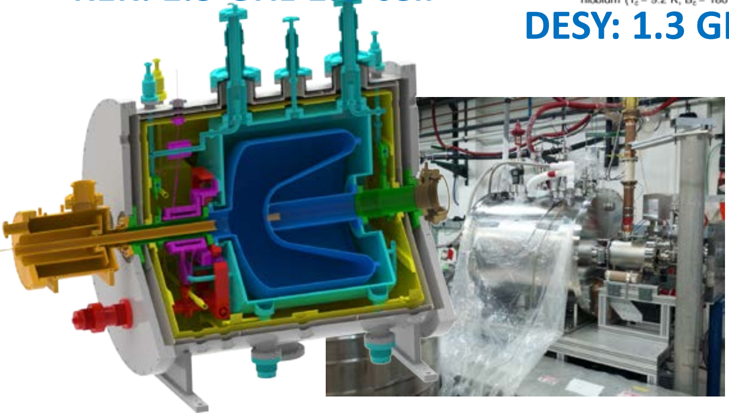
DESY: 1.3 GHz 1.5-cell



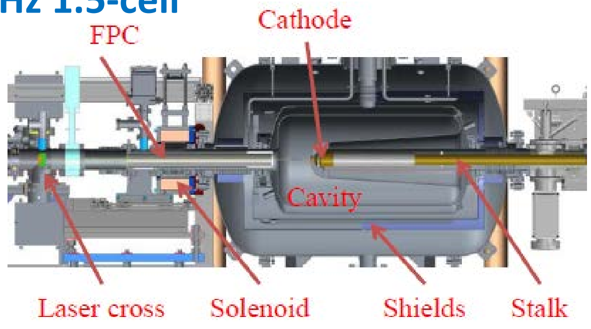
HZB: 1.3 GHz 1.4-cell

PKU: 1.3 GHz 3.5-cell DC-SRF

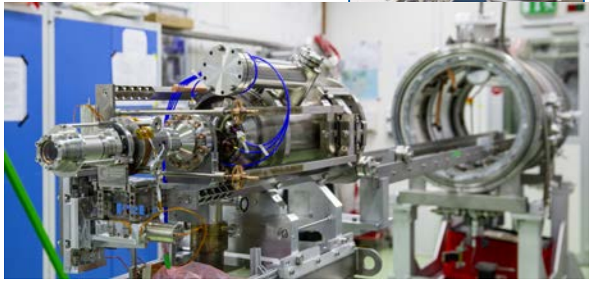




SLAC: 200 MHz QWR-type


FPC
Cathode
Cavity
Laser cross
Solenoid
Shields
Stalk

BNL: 113 MHz QWR-type



HZDR: 1.3 GHz 3.5-cell

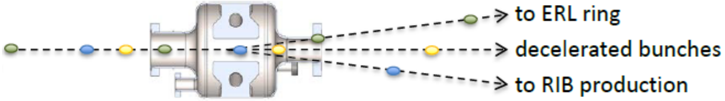
超伝導空洞の応用（2）： Deflecting SRF Cavity

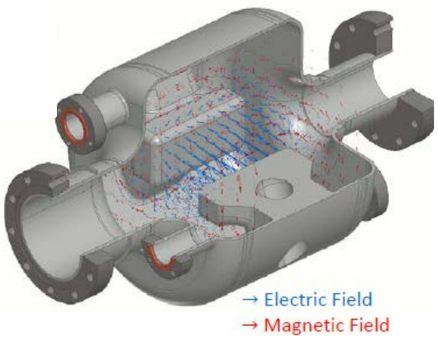
目的:

ビームの向きを変えて、

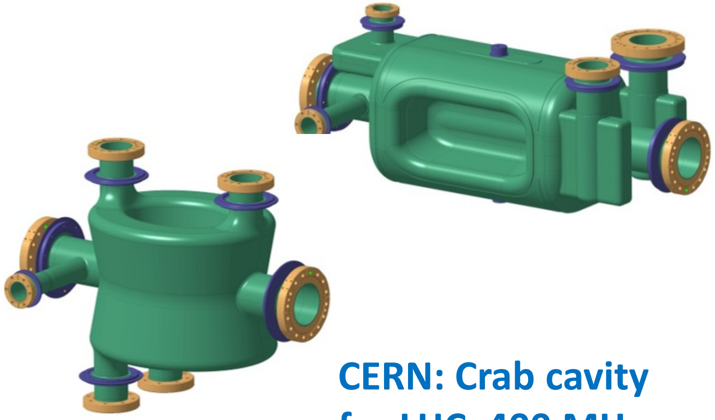
- 行き先を分離する。
- ルミノシティーを増大する。

An RF cavity provides 3-way beam separation

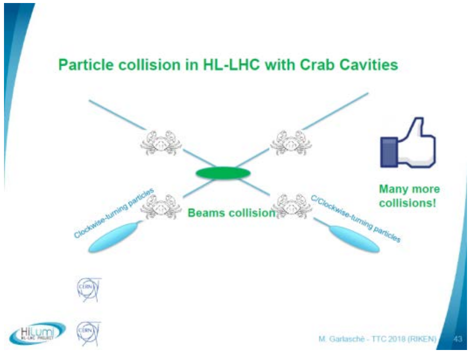

to ERL ring
decelerated bunches
to RIB production


→ Electric Field
→ Magnetic Field

TRIUMF: 650 MHz Deflecting cavity

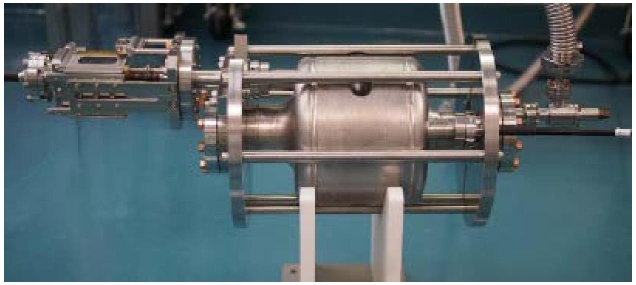


CERN: Crab cavity for LHC, 400 MHz



Particle collision in HL-LHC with Crab Cavities

Clockwise-turning particles
Beams collision
C/Clockwise-turning particles
Many more collisions!
HiLumi HL-LHC PROJECT
CERN
M. Garlaschè - TTC 2018 (RIKEN)
43



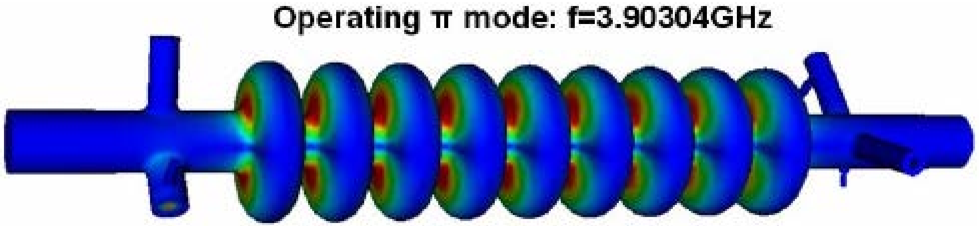

Operating π mode: f=3.90304GHz

FIGURE 2.7-6. Photo of a 3.9GHz 3-cell deflecting cavity built at Fermilab, which achieved 7.5MV/m.

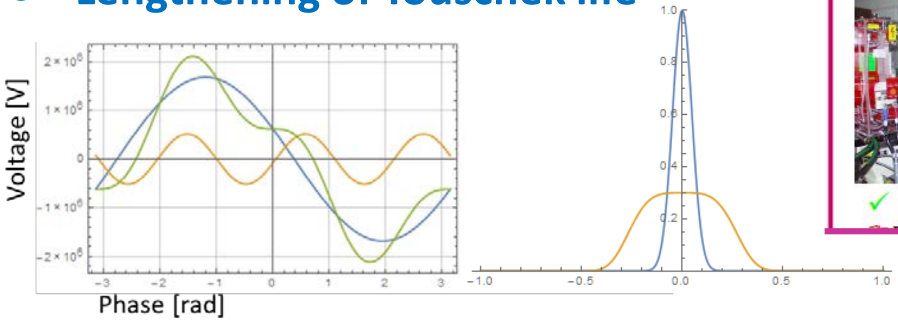
3.9 GHz 9-cell Crab cavity for ILC

超伝導空洞の応用（3）： Harmonic SRF Cavity

目的:

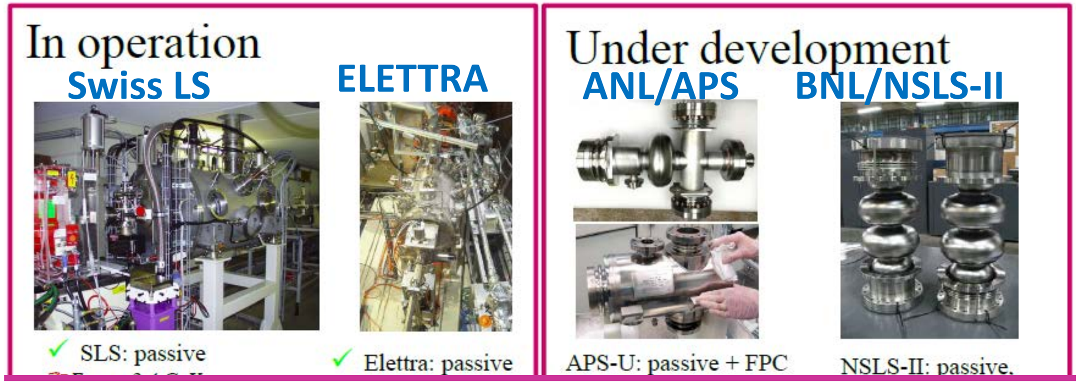
Suppression of intra-beam scattering by bunch lengthening in Light Source

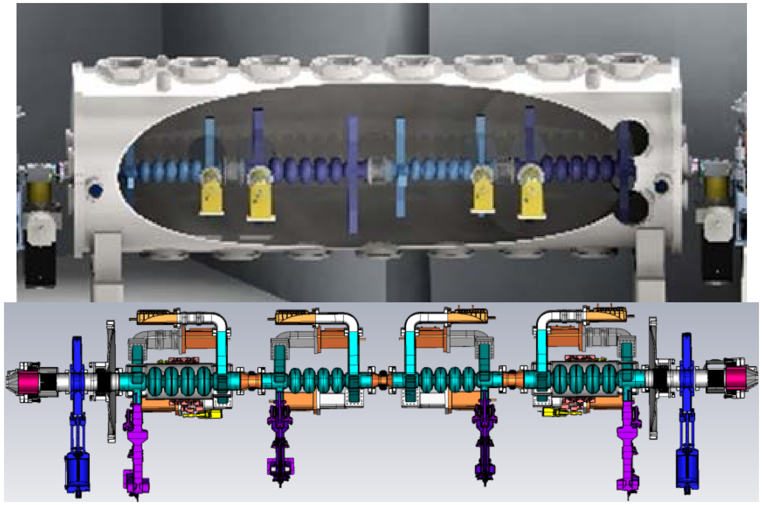
- Reduction of emittance growth
- Lengthening of Touschek life



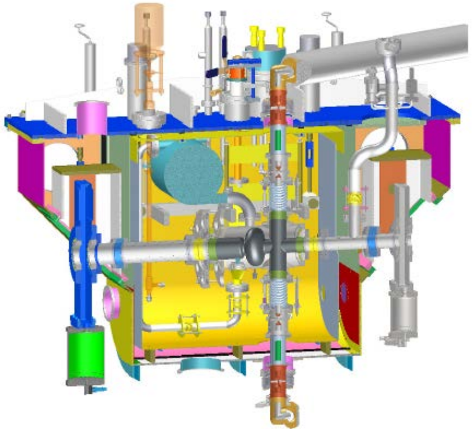
1.5 GHz 3rd Harmonic Cavity

(500 MHz, Fundamental Cavity for Acceleration)

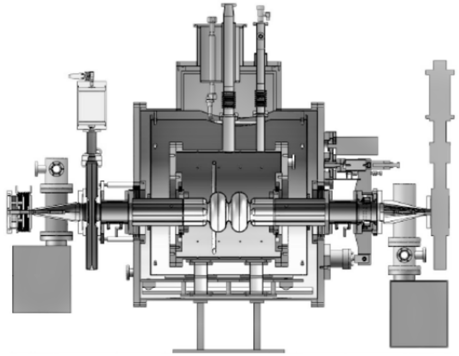

In operation
Swiss LS
ELETTRA
✓ SLS: passive
✓ Elettra: passive
Under development
ANL/APS
BNL/NSLS-II
APS-U: passive + FPC
NSLS-II: passive.



HZB: BESSY VSR, 1.5 GHz & 1.75 GHz



ANL/APS:
3rd Harmonic 1.5 GHz cavity



Shanghai LS:
3rd Harmonic 1.5 GHz cavity

- Pohang LS
- KEK- 3GeV Ring

超伝導空洞の応用（4）： Nb coating on Cu Cavity

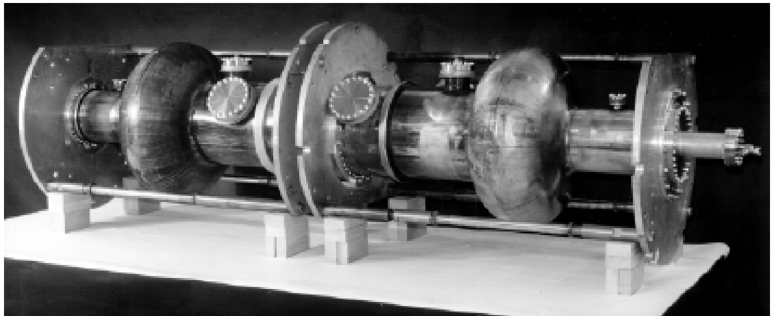
目的:

熱伝導率の高い純銅で空洞を製作
ニオブ薄膜でニオブ材のコスト削減

Beam direction

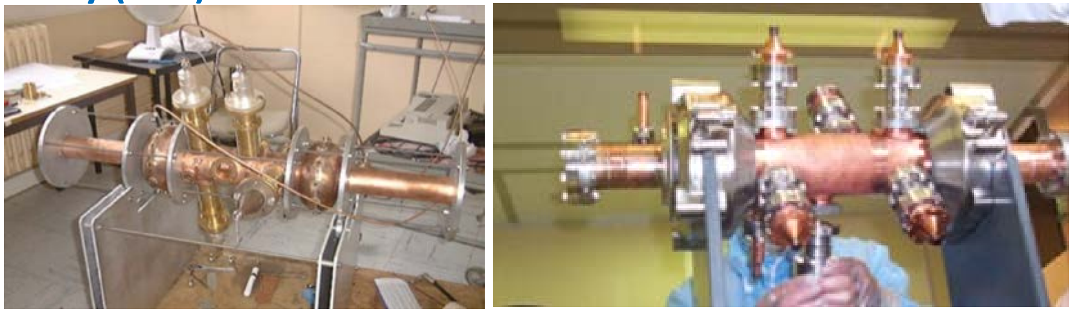
HI-ISOLDE QWR 101 MHz Cavity (CERN)

LHC 400 MHz Cavity (CERN)



SOLEIL 352.5 MHz Cavity (CEA)

ELETTRA 1.5 GHz Cavity (CEA)

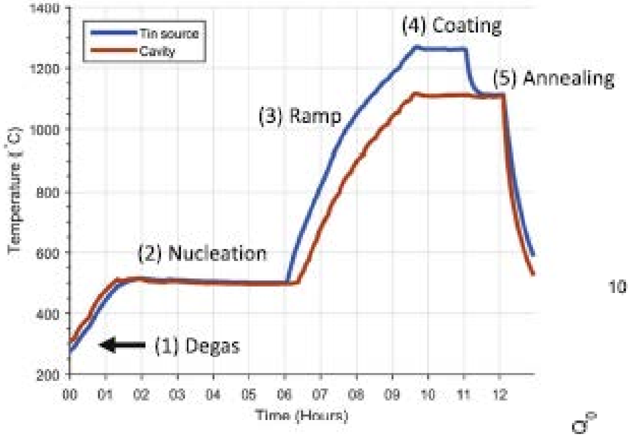


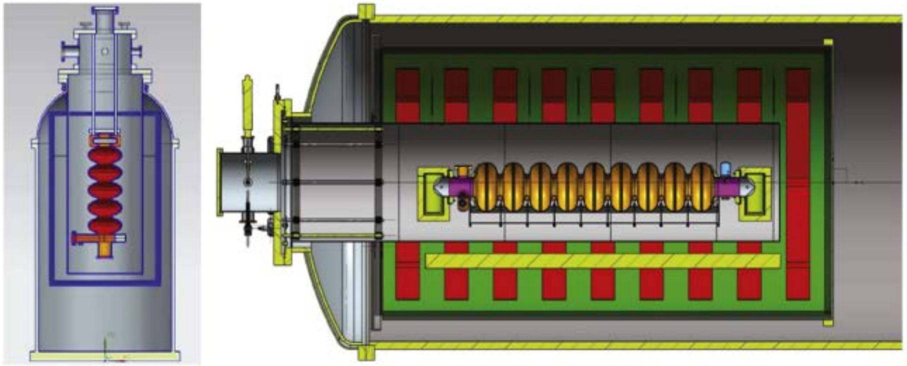
超伝導空洞の応用（5）： Nb_3Sn coating on Nb Cavity

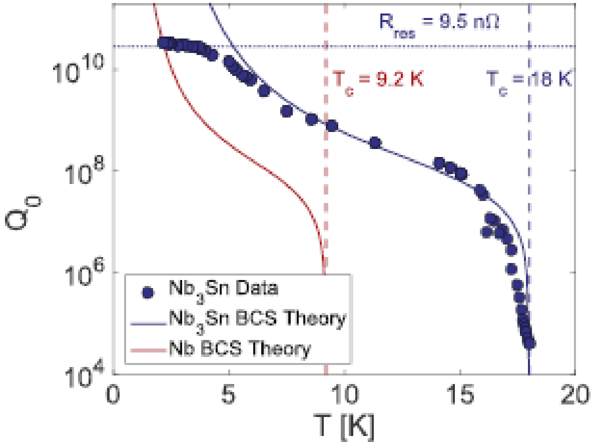
目的：

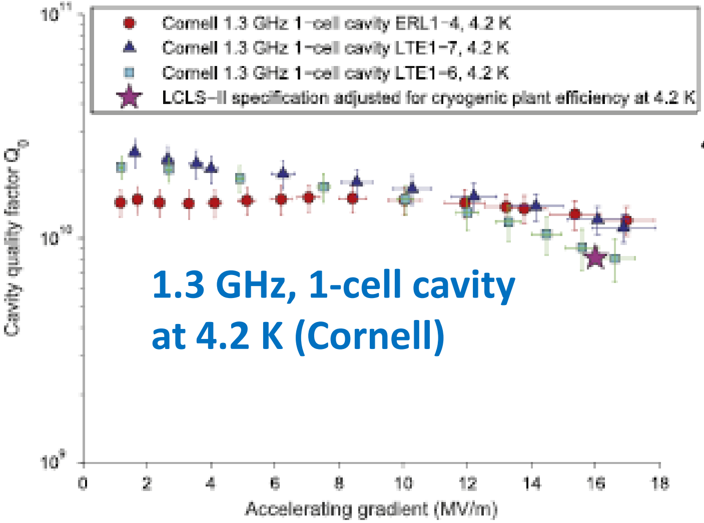
4．2K動作超伝導加速空洞の開発

臨界温度の高いNb_3Sn薄膜ニオブ空洞





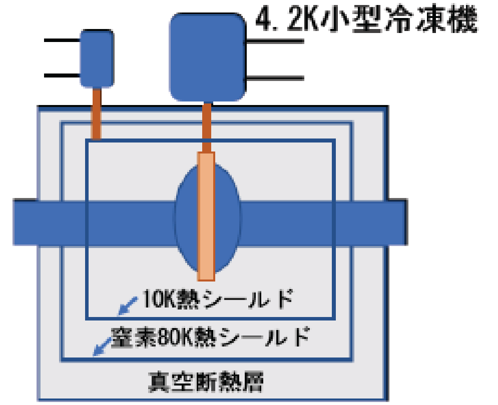




1.3 GHz, 1-cell cavity
at 4.2 K (Cornell)

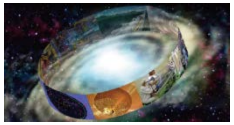
by S. Posen (FNAL)
SC. Sci. Tecnol. 30 (2017) 033004

伝熱冷却による超伝導空洞システム

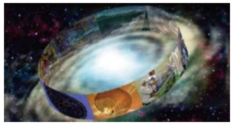


4. 2K小型冷凍機
10K熱シールド
窒素80K熱シールド
真空断熱層

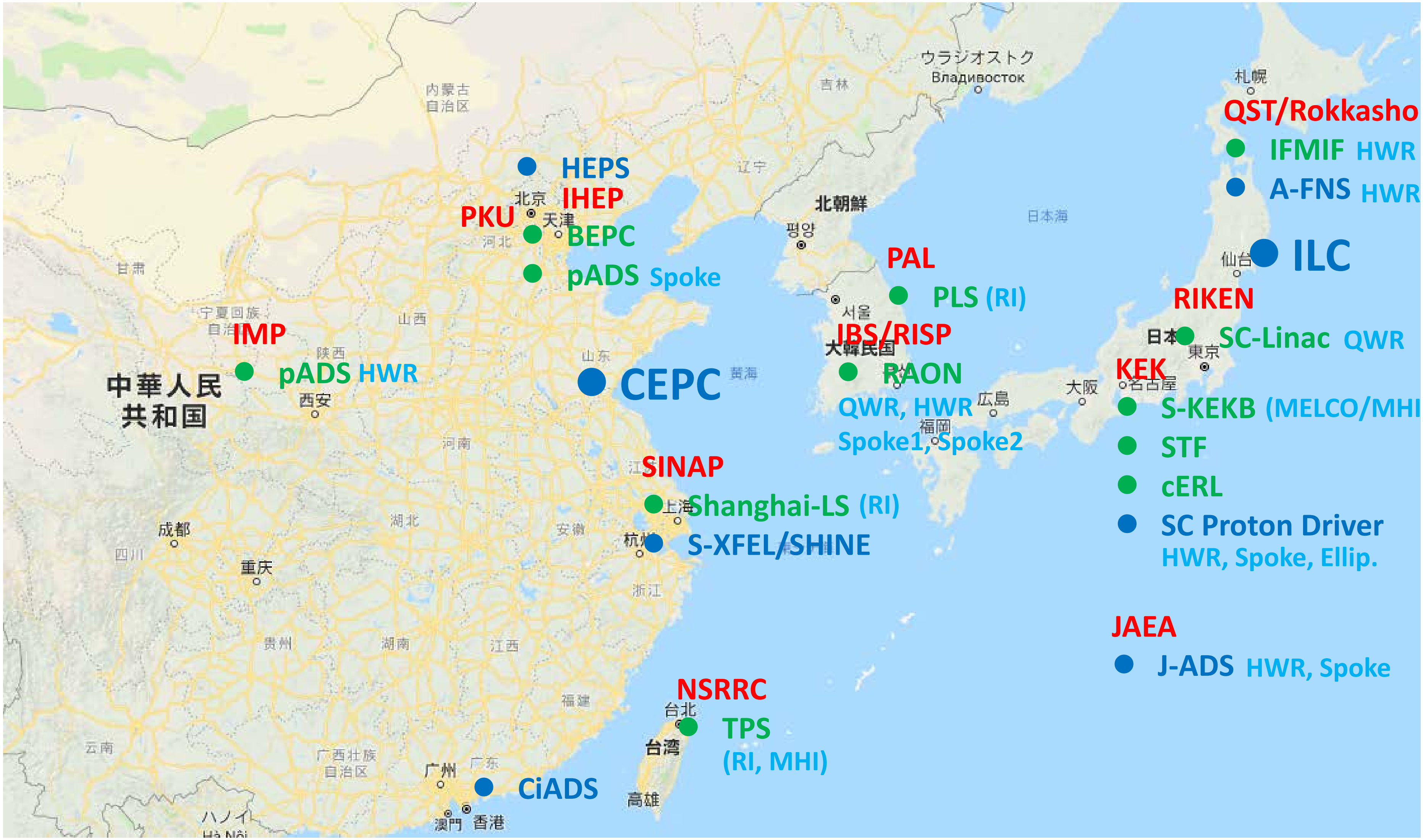
by T. Okada (SOKENDAI/KEK)

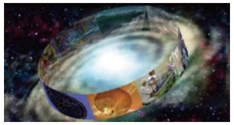


- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに



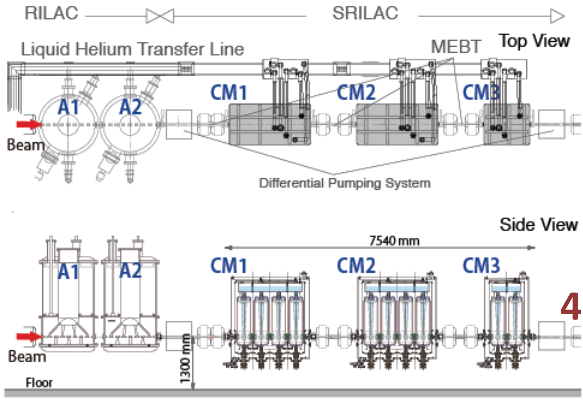
アジアにおける超伝導加速器＆計画　（1）


HEPS
IHEP
PKU
BEPC
pADS Spoke
IMP
pADS HWR
CEPC
PAL
PLS (RI)
IBS/RISP
RAON
QWR, HWR
Spoke1, Spoke2
SINAP
Shanghai-LS (RI)
S-XFEL/SHINE
NSRRC
TPS
(RI, MHI)
CiADS
QST/Rokkasho
IFMIF HWR
A-FNS HWR
ILC
RIKEN
SC-Linac QWR
KEK
S-KEKB (MELCO/MHI)
STF
cERL
SC Proton Driver
HWR, Spoke, Ellip.
JAEA
J-ADS HWR, Spoke
中華人民共和国
北京
天津
西安
成都
重庆
上海
杭州
广州
香港
澳門
台北
台湾
高雄
北朝鮮
평양
서울
大韓民国
ウラジオストク
Владивосток
札幌
仙台
日本
東京
名古屋
大阪
広島
福岡
日本海
黄海
ハノイ
Hà Nội



アジアにおける超伝導加速器＆計画　（2）

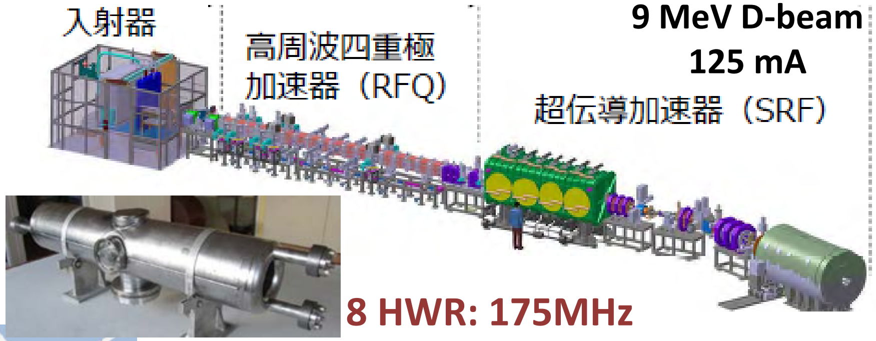
SC-Linac (heavy ions) / RIKEN


RILAC
SRILAC
Liquid Helium Transfer Line
MEBT
Top View
A1
A2
CM1
CM2
CM3
Beam
Differential Pumping System
Side View
7540 mm
1300 mm
Floor

by N. Sakamoto (RIKEN) in LINAC18

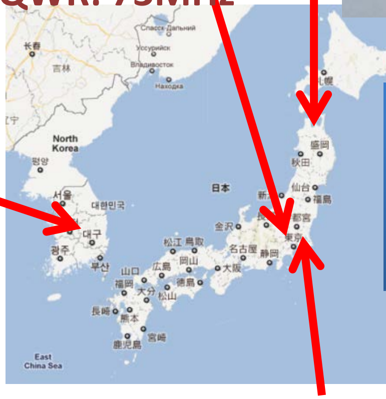
4+4+2 QWR: 73MHz

IFMIF-LIPAc (deuterons) / QST-Rokkasho

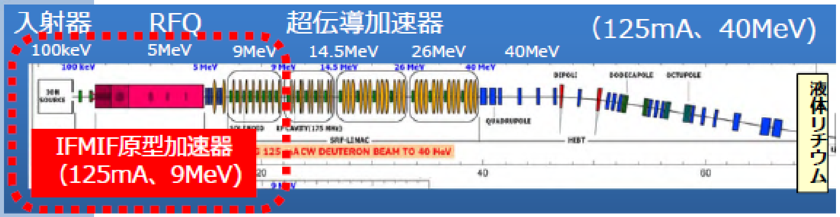

入射器
高周波四重極
加速器（RFQ）
超伝導加速器（SRF）

9 MeV D-beam
125 mA

8 HWR: 175MHz


North Korea
日本
East China Sea

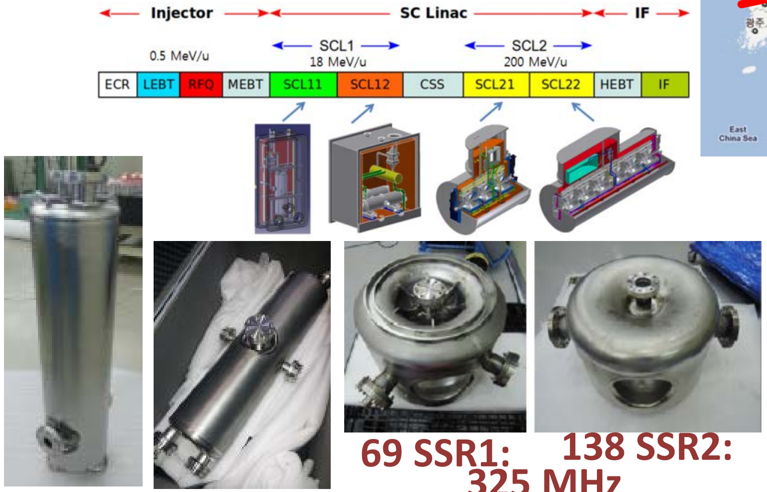
A-FNS (deuterons) / QST-Rokkasho


入射器
RFQ
超伝導加速器
（125mA、40MeV）
100keV
5MeV
9MeV
14.5MeV
26MeV
40MeV
IFMIF原型加速器
（125mA、9MeV）
液体リチウム

8+10+12+12 HWR: 175MHz

by A. Kasugai (QST) in 15th Kasokuki-Gakkai

RAON (heavy ions)/ IBS-RISP


Injector
SC Linac
IF
0.5 MeV/u
SCL1
18 MeV/u
SCL2
200 MeV/u
ECR
LEBT
RFQ
MEBT
SCL11
SCL12
CSS
SCL21
SCL22
HEBT
IF

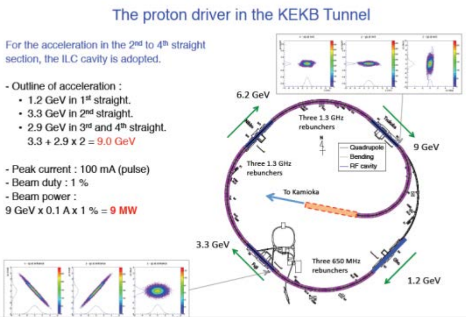
28 QWR: 81.25MHz

76 HWR: 162.5MHz

69 SSR1: 138 SSR2: 325 MHz

by D. Jeon (IBS) in SRF17

SC Proton Driver (protons) / KEK-Tsukuba

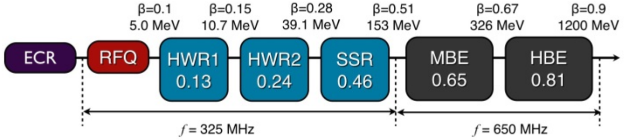


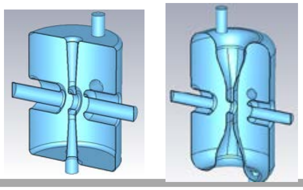
The proton driver in the KEKB Tunnel

For the acceleration in the 2nd to 4th straight section, the ILC cavity is adopted.

- Outline of acceleration :
  - 1.2 GeV in 1st straight.
  - 3.3 GeV in 2nd straight.
  - 2.9 GeV in 3rd and 4th straight.
  - 3.3 + 2.9 x 2 = 9.0 GeV
- Peak current : 100 mA (pulse)
- Beam duty : 1 %
- Beam power :
  9 GeV x 0.1 A x 1 % = 9 MW

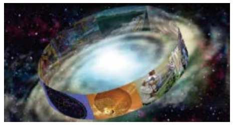
6.2 GeV
9 GeV
3.3 GeV
1.2 GeV
Three 1.3 GHz rebunchers
Three 650 MHz rebunchers
To Kamioka
Quadrupole
Bending
RF cavity


β=0.1
5.0 MeV
β=0.15
10.7 MeV
β=0.28
39.1 MeV
β=0.51
153 MeV
β=0.67
326 MeV
β=0.9
1200 MeV
ECR
RFQ
HWR1 0.13
HWR2 0.24
SSR 0.46
MBE 0.65
HBE 0.81
f = 325 MHz
f = 650 MHz



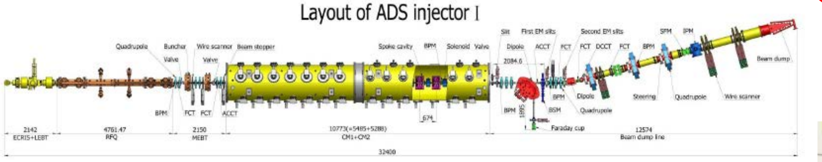
HWR: 325MHz

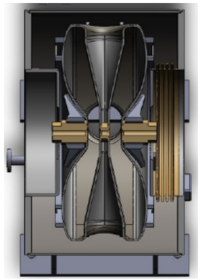
by T. Koseki (KEK) in SRF17



アジアにおける超伝導加速器＆計画　（3）

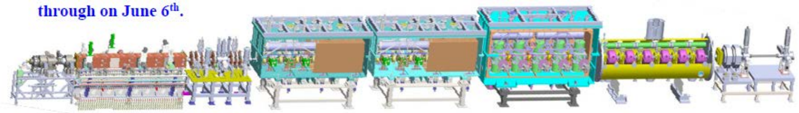
ADS Injector-1 (protons) / IHEP


Layout of ADS injector I



β = 0.12, 325 MHz, Spoke

ADS Injector-2 (protons) / IMP

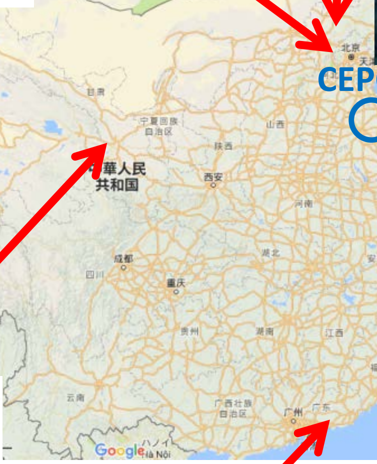

through on June 6th.

Taper HWR015

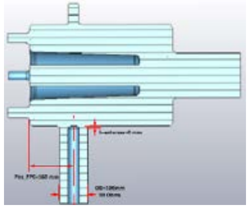
β = 0.10 & 0.15, 162.5 MHz, HWR

by Y. He (IHEP)
in SRF2017

China initiative Accelerator Driven System (CiADS) at Huizhou (惠州)

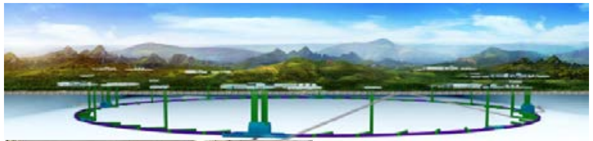


High Energy Photon Source / HEPS



5 x 166.6 MHz QWR
2 x 500 MHz 3rd H Cavity

Circular e-e+ Collider/ CEPC



160 x 1.3 GHz,
9-cell cavity

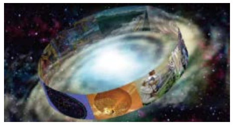
336 x 650 MHz, 2-cell cavity

Shanghai X-FEL / SHINE

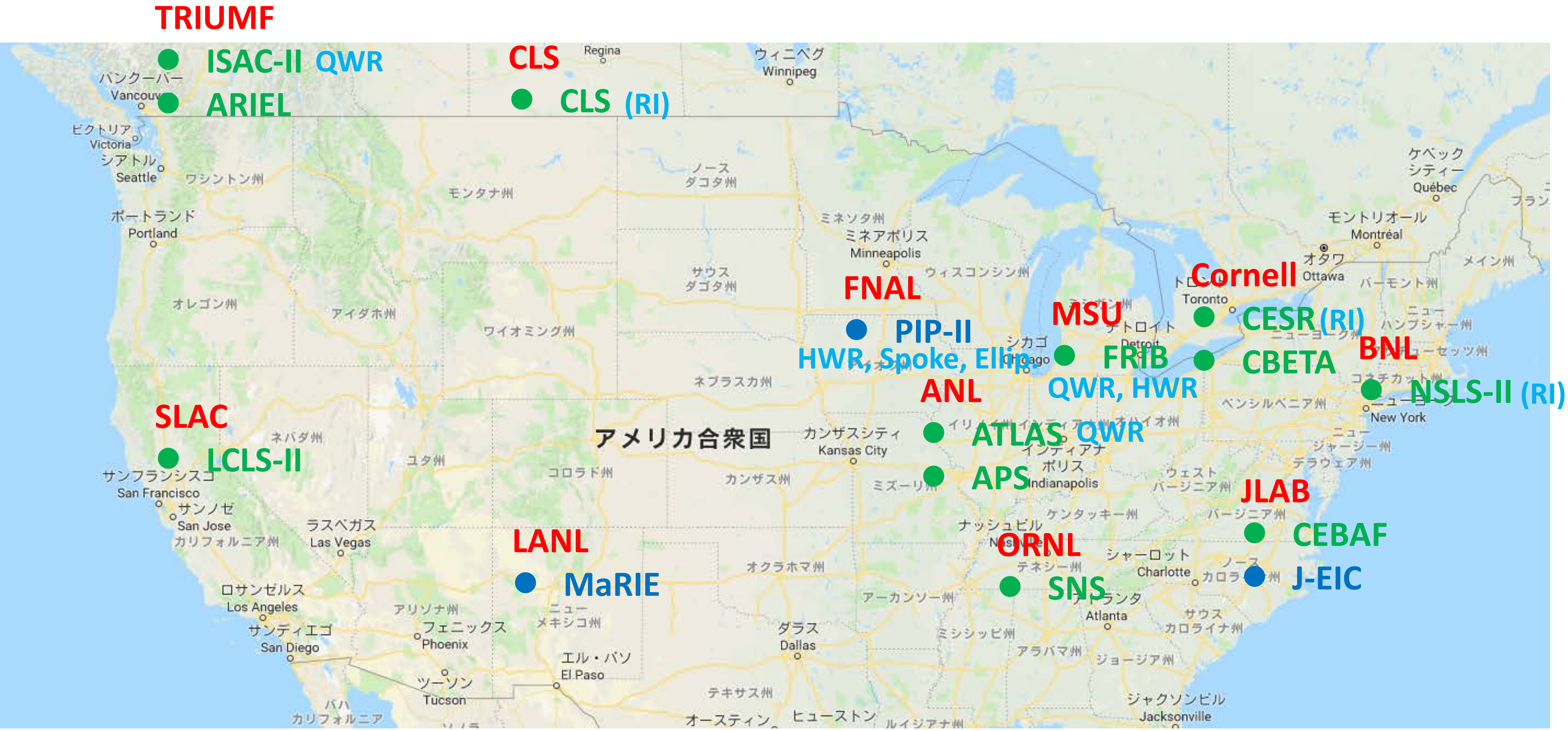
SCLF
Limited R&D through XFEL-TF
special focus

600 x 1.3 GHz, 9-cell cavity
75 Cryomodules

by D. Wang (SINAP)
in TTC18/INFN

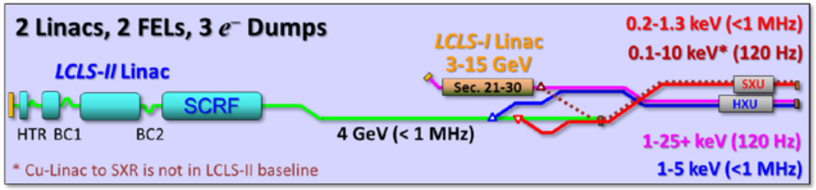


アメリカにおける超伝導加速器＆計画　（１）

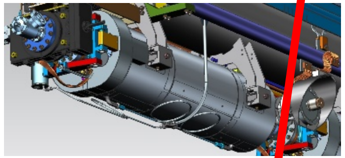

TRIUMF
● ISAC-II QWR
● ARIEL
CLS
● CLS (RI)
SLAC
● LCLS-II
LANL
● MaRIE
FNAL
● PIP-II
HWR, Spoke, Ellip
ANL
● ATLAS QWR
● APS
MSU
● FRIB
QWR, HWR
Cornell
● CESR (RI)
● CBETA
BNL
● NSLS-II (RI)
JLAB
● CEBAF
● J-EIC
ORNL
● SNS
アメリカ合衆国

アメリカにおける超伝導加速器＆計画 （2）

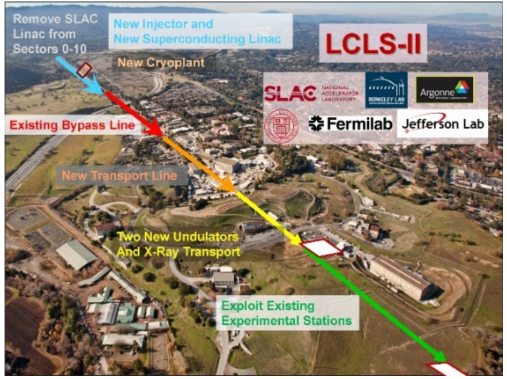
LCLS-II (XFEL)/ SLAC


2 Linacs, 2 FELs, 3 e^- Dumps
LCLS-II Linac
SCRF
HTR BC1
BC2
4 GeV (< 1 MHz)
LCLS-I Linac
3-15 GeV
Sec. 21-30
SXU
HXU
0.2-1.3 keV (<1 MHz)
0.1-10 keV* (120 Hz)
1-25+ keV (120 Hz)
1-5 keV (<1 MHz)
* Cu-Linac to SXR is not in LCLS-II baseline

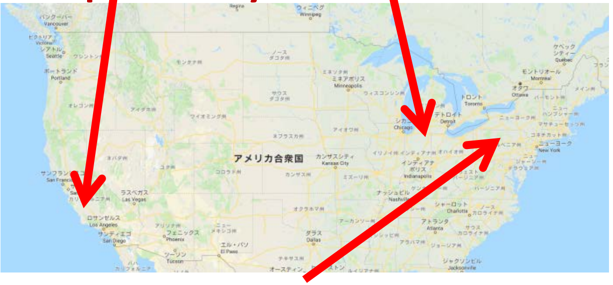
280 x 1.3 GHz, 9-cell cavity
35 Cryomodules



High-Q : N-doped cavity

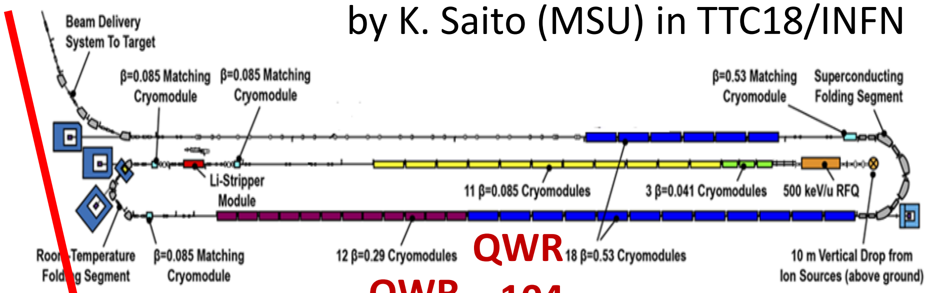

Remove SLAC Linac from Sectors 0-10
New Injector and New Superconducting Linac
New Cryoplant
LCLS-II
SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY
BERKELEY LAB
Argonne
Fermilab
Jefferson Lab
Existing Bypass Line
New Transport Line
Two New Undulators And X-Ray Transport
Exploit Existing Experimental Stations

by M. Ross (SLAC) in TTC18/INFN

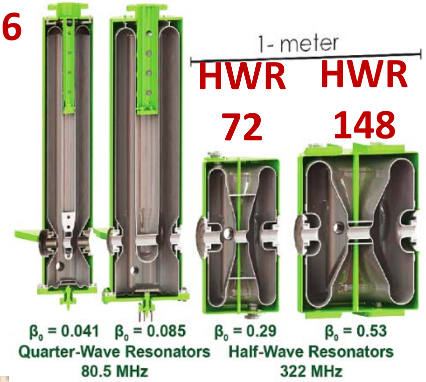


FRIB (heavy ions) / MSU

by K. Saito (MSU) in TTC18/INFN

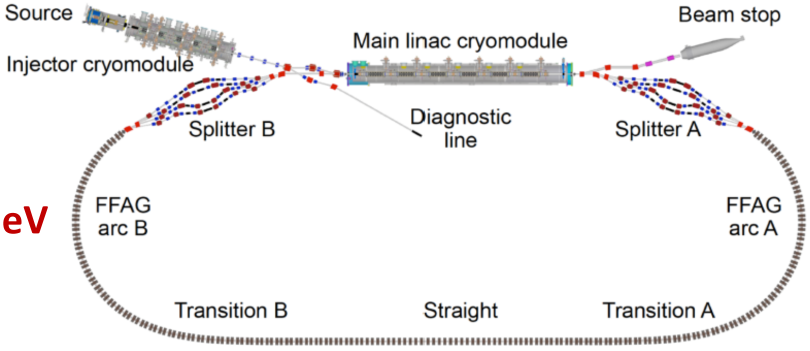

Beam Delivery System To Target
β=0.085 Matching Cryomodule
β=0.085 Matching Cryomodule
β=0.53 Matching Cryomodule
Superconducting Folding Segment
Li-Stripper Module
11 β=0.085 Cryomodules
3 β=0.041 Cryomodules
500 keV/u RFQ
Room-Temperature Folding Segment
β=0.085 Matching Cryomodule
12 β=0.29 Cryomodules
18 β=0.53 Cryomodules
10 m Vertical Drop from Ion Sources (above ground)

Total cavities 340

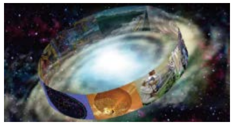

QWR 16
QWR 104
HWR 72
HWR 148
1- meter
β_0 = 0.041
β_0 = 0.085
β_0 = 0.29
β_0 = 0.53
Quarter-Wave Resonators 80.5 MHz
Half-Wave Resonators 322 MHz

CBETA (ERL) / Cornell

- **Injector: 6 MeV**
  5 x 1.3 GHz,
  2-cell Cavity
- **Main LINAC: +36 MeV**
  6 x 1.3 GHz,
  7-cell Cavity


Source
Injector cryomodule
Main linac cryomodule
Beam stop
Splitter B
Diagnostic line
Splitter A
FFAG arc B
FFAG arc A
Transition B
Straight
Transition A

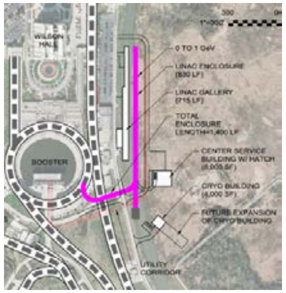
by G. Hoffstaetter (Cornell) in ERL17

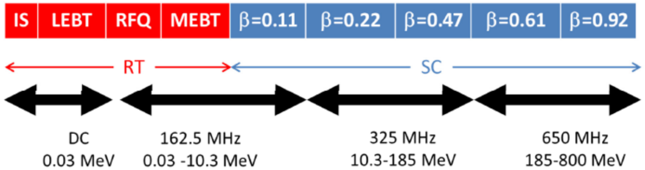


アメリカにおける超伝導加速器＆計画 （3）

PIP-II (proton) / FNAL

by S. Mishra (FNAL) in HB2016


WILSON HALL
BOOSTER
0 TO 1 GeV
LINAC ENCLOSURE (630 LF)
LINAC GALLERY (715 LF)
TOTAL ENCLOSURE LENGTH=1,400 LF
CENTER SERVICE BUILDING W/ HATCH (8,000 SF)
CRYO BUILDING (4,000 SF)
FUTURE EXPANSION OF CRYO BUILDING
UTILITY CORRIDOR
300
1"=300'

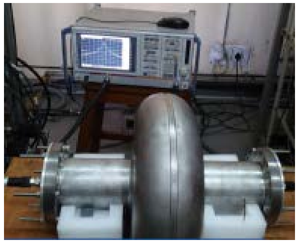

IS
LEBT
RFQ
MEBT
β=0.11
β=0.22
β=0.47
β=0.61
β=0.92
RT
SC
DC
0.03 MeV
162.5 MHz
0.03 -10.3 MeV
325 MHz
10.3-185 MeV
650 MHz
185-800 MeV

8 x 162.5 MHz

β = 0.11, HWR

16+35 x 325 MHz

β = 0.22, 0.47 Spoke



33 x 650 MHz

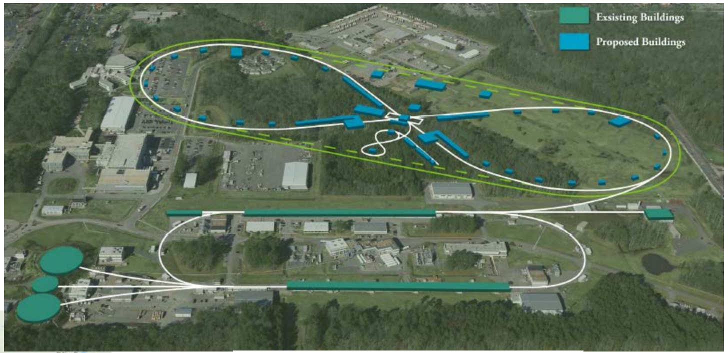
β = 0.61, 5-cell cavity

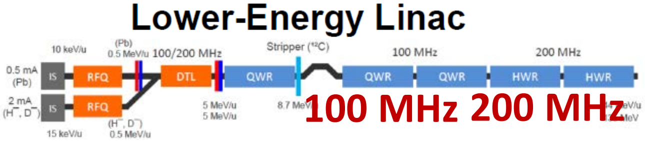
24 x 650 MHz

β = 0.92, 5-cell cavity

J-EIC (electron-ion Collider) / JLab

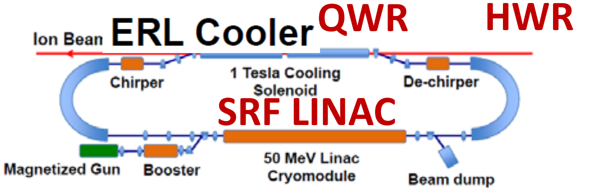
by V. Morozov (JLab) in NAPAC16


Exsisting Buildings
Proposed Buildings


Lower-Energy Linac
10 keV/u
(Pb)
0.5 MeV/u
100/200 MHz
Stripper (¹²C)
100 MHz
200 MHz
0.5 mA (Pb)
2 mA (H⁻, D⁻)
IS
RFQ
DTL
QWR
QWR
QWR
HWR
HWR
15 keV/u
(H⁻, D⁻) 0.5 MeV/u
5 MeV/u
5 MeV/u
8.7 MeV/u

100 MHz 200 MHz

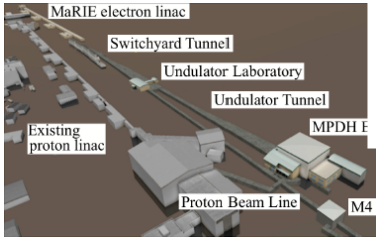
QWR HWR


Ion Beam
ERL Cooler
Chirper
1 Tesla Cooling Solenoid
De-chirper
Magnetized Gun
Booster
50 MeV Linac Cryomodule
Beam dump

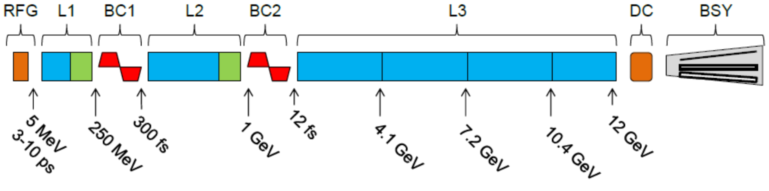
SRF LINAC

MaRIE (FEL) / LANL

by J.W. Lewellen (LANL) in IPAC15

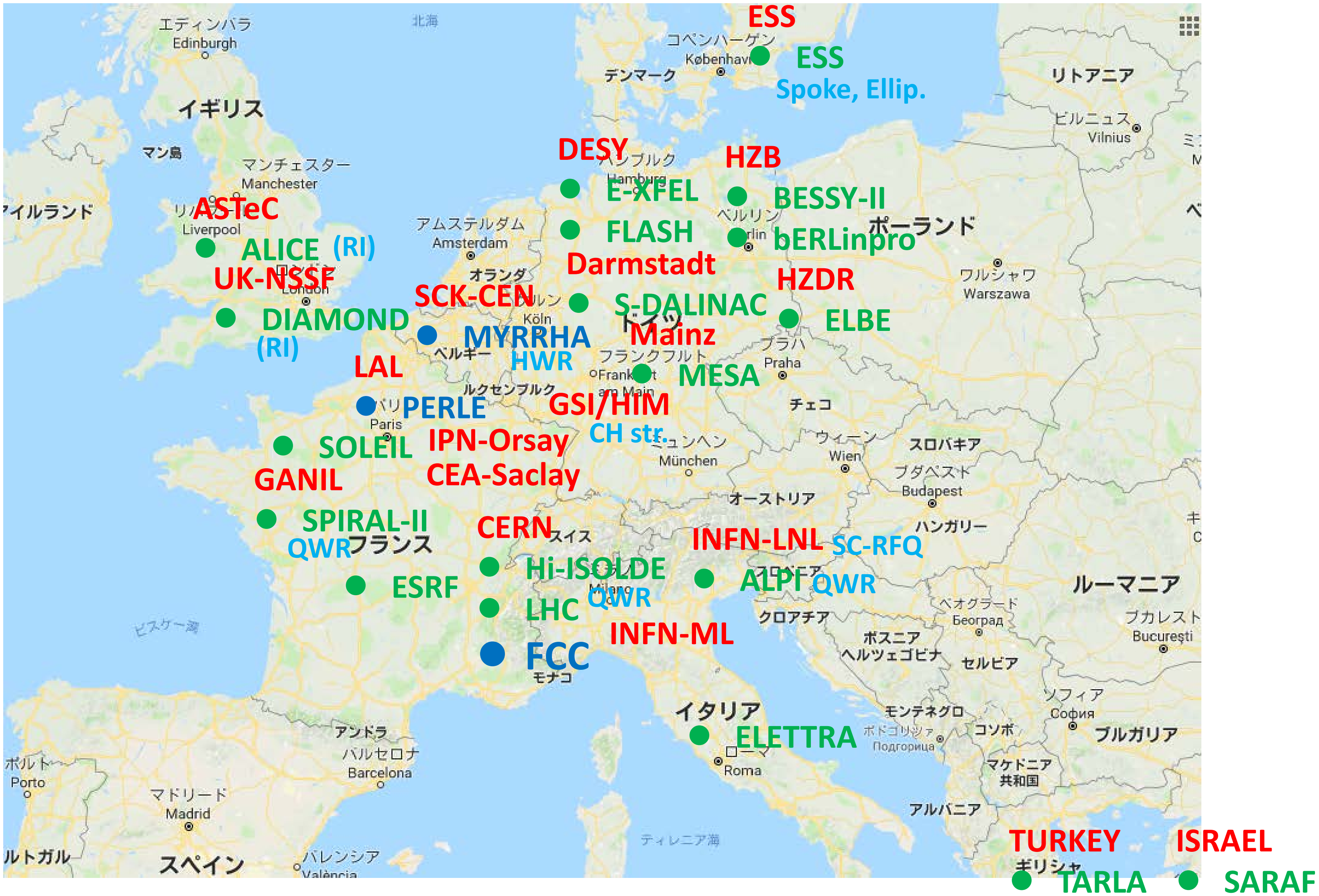

MaRIE electron linac
Switchyard Tunnel
Undulator Laboratory
Undulator Tunnel
MPDH
Existing proton linac
Proton Beam Line
M4 Experimental Hall

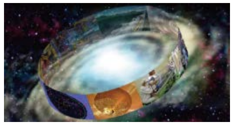
11 **78** **360 x 1.3 GHz, 9-cell cavity**


RFG
L1
BC1
L2
BC2
L3
DC
BSY
5 MeV
3-10 ps
250 MeV
300 fs
1 GeV
12 fs
4.1 GeV
7.2 GeV
10.4 GeV
12 GeV

Total 460, 1.3 GHz, 9-cell cavity at 31.5 MV/m

ヨーロッパにおける超伝導加速器＆計画 （1）

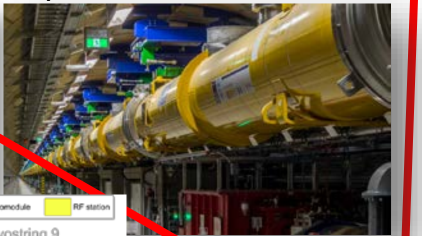

ESS
● ESS
Spoke, Ellip.
DESY
● E-XFEL
● FLASH
HZB
● BESSY-II
● bERLinpro
ASTeC
● ALICE (RI)
UK-NSSF
● DIAMOND
(RI)
Darmstadt
● S-DALINAC
HZDR
● ELBE
SCK-CEN
● MYRRHA
HWR
Mainz
● MESA
LAL
● PERLE
GSI/HIM
CH str.
● SOLEIL
IPN-Orsay
CEA-Saclay
GANIL
● SPIRAL-II
QWR
CERN
● Hi-ISOLDE
QWR
● LHC
● FCC
● ESRF
INFN-LNL
SC-RFQ
● ALPI QWR
INFN-ML
● ELETTRA
TURKEY
● TARLA
ISRAEL
● SARAF
イギリス
フランス
スペイン
イタリア
ドイツ
ポーランド

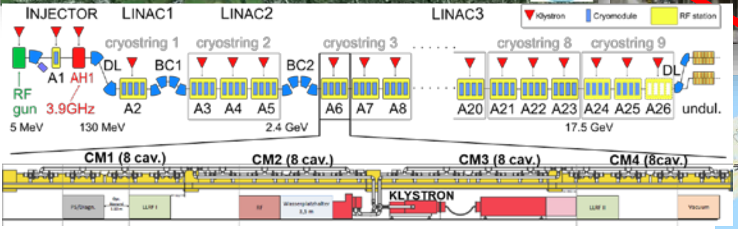


ヨーロッパにおける超伝導加速器＆計画 （2）

E-XFEL/DESY by J. Branlard (DESY) in TTC18/INFN

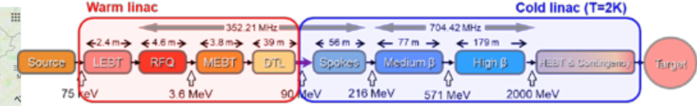
European XFEL
3.4 km
DESY



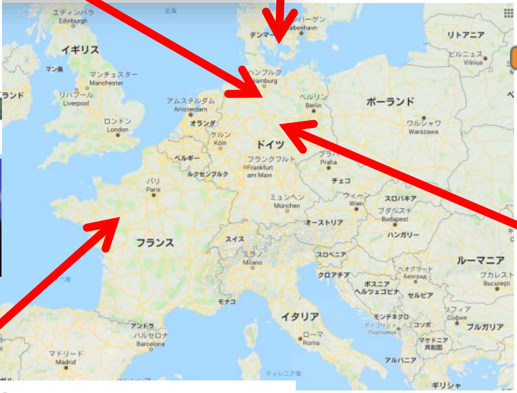

INJECTOR
LINAC1
LINAC2
LINAC3
Klystron
Cryomodule
RF station
cryostring 1
cryostring 2
cryostring 3
cryostring 8
cryostring 9
DL
BC1
BC2
A1
AH1
RF gun
3.9GHz
A2
A3 A4 A5
A6 A7 A8
A20 A21 A22 A23 A24 A25 A26
undul.
5 MeV
130 MeV
2.4 GeV
17.5 GeV
CM1 (8 cav.)
CM2 (8 cav.)
CM3 (8 cav.)
CM4 (8cav.)
KLYSTRON

800 x 1.3 GHz
9-cell cavity
100 Cryomodules

ESS (proton) / LUND by R. Ruber (FREIA) in TTC18/INFN


Warm linac
Cold linac (T=2K)
352.21 MHz
704.42 MHz
2.4 m
4.6 m
3.8 m
39 m
56 m
77 m
179 m
Source
LEBT
RFQ
MEBT
DTL
Spokes
Medium β
High β
HEBT & Contingency
Target
75 keV
3.6 MeV
90 MeV
216 MeV
571 MeV
2000 MeV

325.2 MHz	**704.4 MHz**	**704.4 MHz**
Spoke x 26	**6-cell x 36**	**5-cell x 84**


イギリス
ドイツ
ポーランド
フランス
イタリア
スイス
オーストリア
チェコ
ルーマニア

bERLinPro (ERL) /HZB by J.Kuehn (HZB) in TTC18/RIKEN

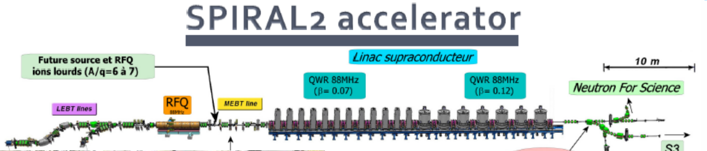
Mail Linac
3 x 1.3 GHz, 7-cell Cavity

Booster
3 x 1.3 GHz
2-cell Cavity

1.3 GHz, 1.4-cell
SRF-Gun Cavity

SPIRAL-2 (Heavy ions) / GANIL

SPIRAL2 accelerator


Future source et RFQ ions lourds (A/q=6 à 7)
Linac supraconducteur
QWR 88MHz (β= 0.07)
QWR 88MHz (β= 0.12)
10 m
Neutron For Science
LEBT lines
RFQ
MEBT line
S3
Spiral2 Accélérateur SPIRAL2
d⁺: 20 MeV/n
HI : 14.5 MeV/n
Production (Phase2)

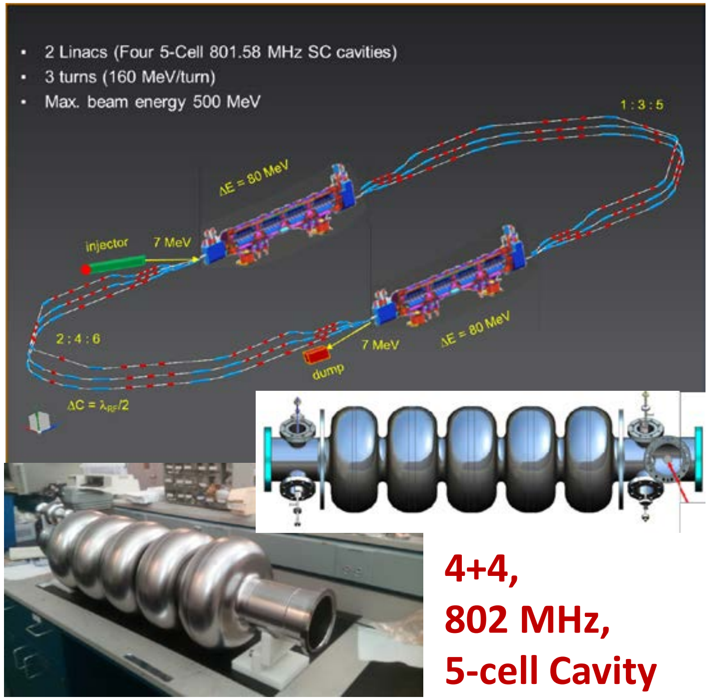
down started. RF when safety authorization

12 + 14
88 MHz, QWR
β = 0.07, 0.12

by R. Ferdinand (GANIL) in IPAC17

ヨーロッパにおける超伝導加速器＆計画 （3）

PERLE (ERL) / LAL-Orsay


- 2 Linacs (Four 5-Cell 801.58 MHz SC cavities)
- 3 turns (160 MeV/turn)
- Max. beam energy 500 MeV

1 : 3 : 5
ΔE = 80 MeV
injector
7 MeV
2 : 4 : 6
dump
7 MeV
ΔE = 80 MeV
ΔC = λRF/2

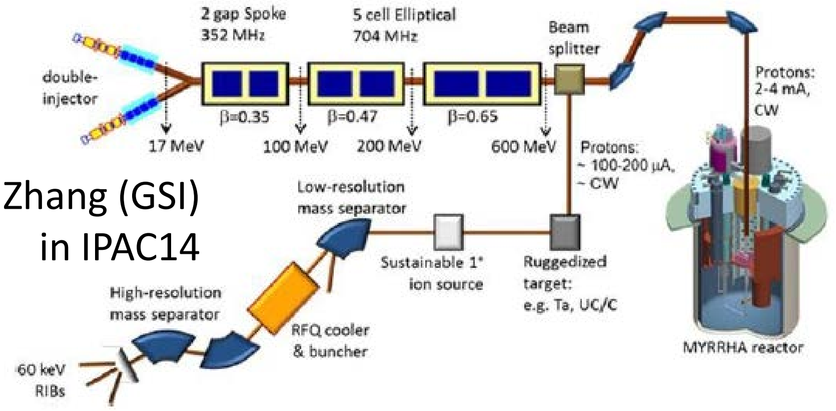
4+4,
802 MHz,
5-cell Cavity

by W. Kaabi (LAL-Orsay)
in LINAC18

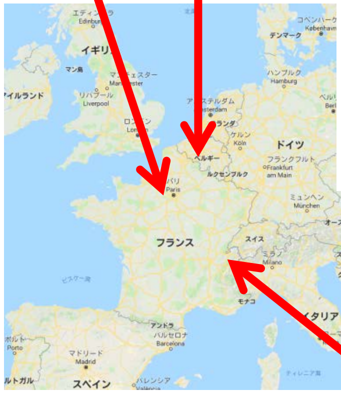
MYRRHA (ADS) /SCK-CEN

48 x 352.2 MHz, Spoke Cavity

34 + 60 x 704.4 MHz, 5-cell Cavity


2 gap Spoke
352 MHz
5 cell Elliptical
704 MHz
Beam splitter
double-injector
β=0.35
β=0.47
β=0.65
17 MeV
100 MeV
200 MeV
600 MeV
Protons: 2-4 mA, CW
Protons: ~ 100-200 μA, ~ CW
Low-resolution mass separator
Sustainable 1+ ion source
Ruggedized target: e.g. Ta, UC/C
High-resolution mass separator
RFQ cooler & buncher
60 keV RIBs
MYRRHA reactor

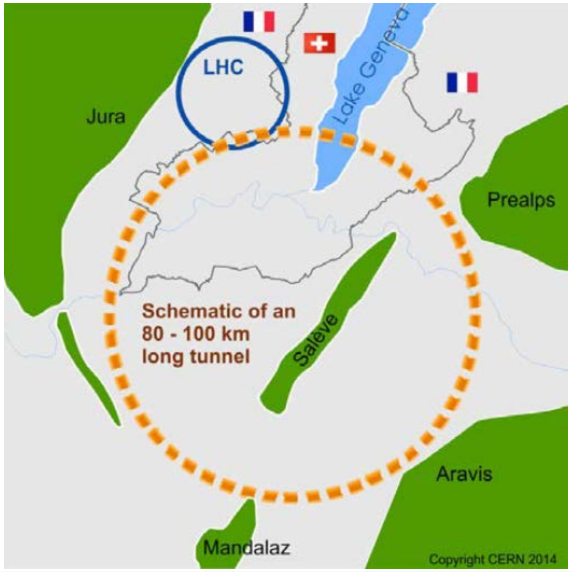
by C. Zhang (GSI)
in IPAC14


イギリス
ドイツ
フランス
スイス
オーストリア
ハンガリー
イタリア
スペイン

FCC (Future Circular Collider) / CERN

800 MHz, 1-cell Cavity

800 MHz, 5-cell Cavity


LHC
Lake Geneva
Jura
Prealps
Schematic of an 80 - 100 km long tunnel
Saleve
Aravis
Mandalaz
Copyright CERN 2014

by M. Benedikt (CERN)
in IPAC18

SRFの世界で活躍する世界的企業： Ｒ Ｉ （1）

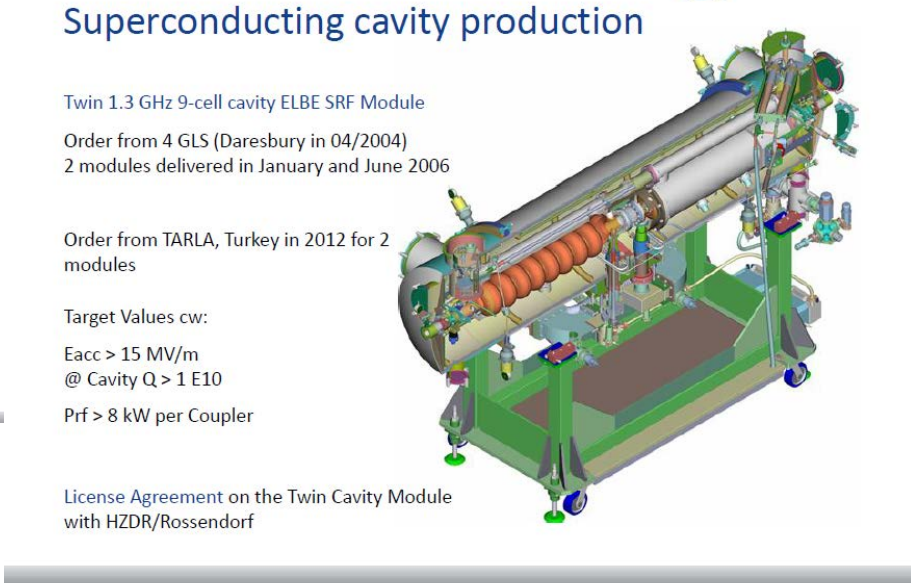
Michael Pekeler
RI Research Instruments GmbH
Friedrich-Ebert-Str. 1
51429 Bergisch Gladbach
Germany

XFEL cavity manufacturing impressions

End tubes, HOM couplers

Metrological inspection of dumbbells

Dumbbells and stiffening rings, welded dumbbells



Superconducting cavity production

Twin 1.3 GHz 9-cell cavity ELBE SRF Module

Order from 4 GLS (Daresbury in 04/2004)
2 modules delivered in January and June 2006

Order from TARLA, Turkey in 2012 for 2 modules

Target Values cw:

Eacc > 15 MV/m
@ Cavity Q > 1 E10

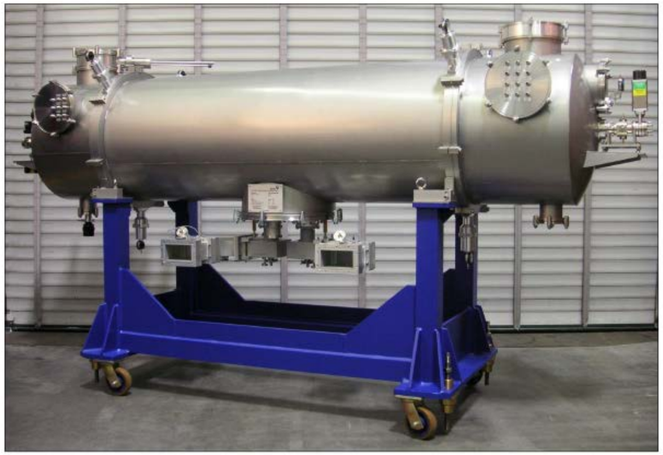
Prf > 8 kW per Coupler

License Agreement on the Twin Cavity Module with HZDR/Rossendorf

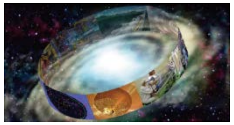
XFEL cavities / subcomponents

We are now producing 16 cavities / month

400 cavities for E-XFEL, 140 cavities for LCLS-II



RI / HZDR-type 1.3GHz Cryomodule



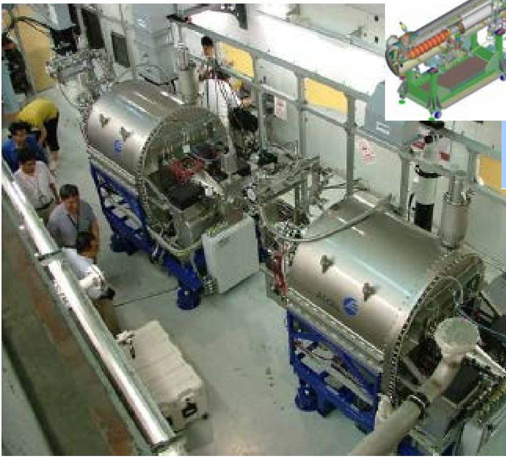
SRFの世界で活躍する世界的企業： ＲＩ（2）

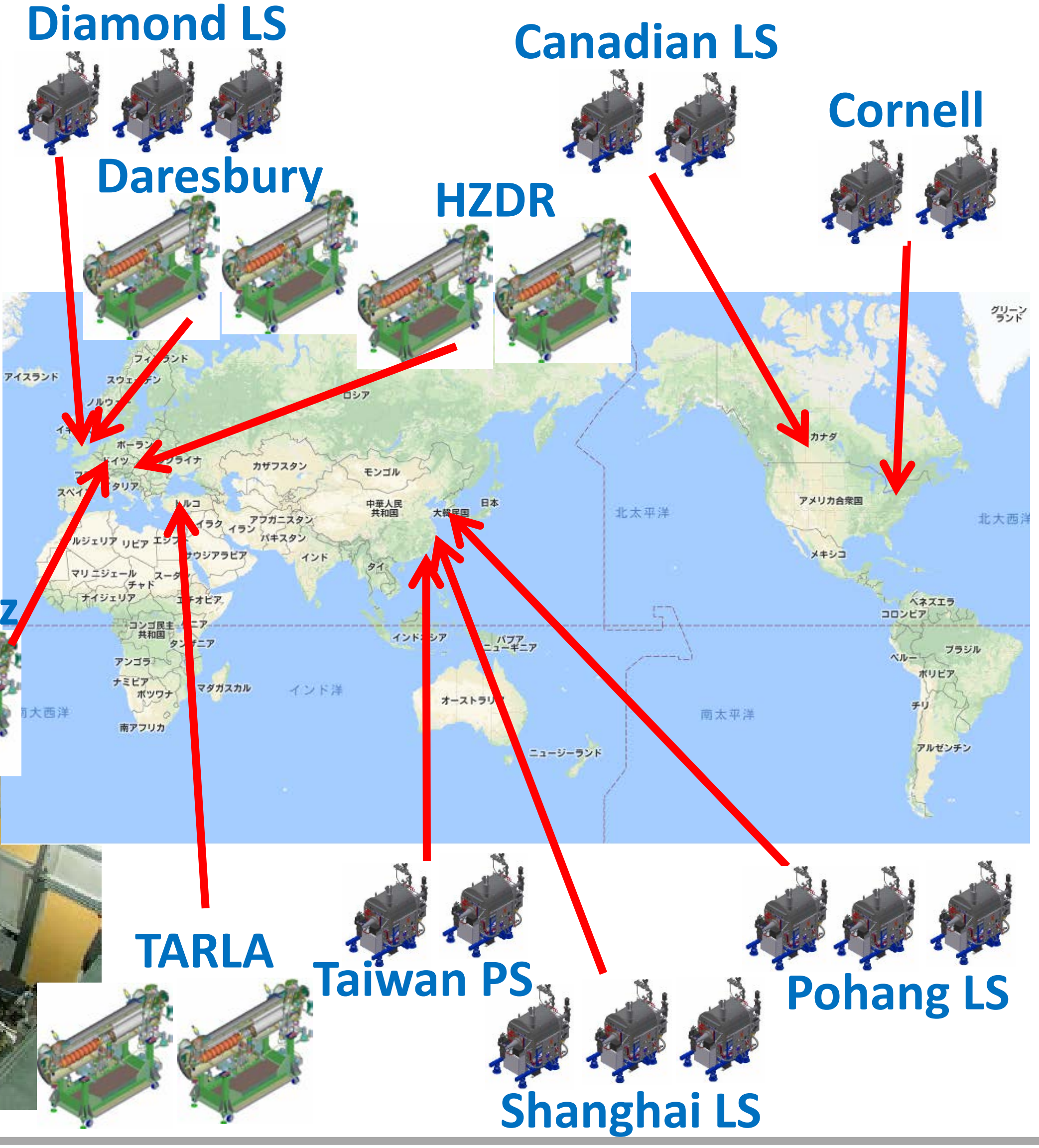
RI / Cornell-type 500 MHz Cryomodule

500 MHz SRF accelerator

Technology transfer from Cornell University, U

2000:	2 SRF modules	for NSRRC,
2000:	2 SRF modules	for CORNELL,
2000:	2 SRF modules	for CLS,
2003:	3 SRF modules	for DLS,
2005:	3 SRF modules	for SSRF,
2010:	3 SRF modules	for PAL,
2012:	1 SRF module	for DLS





Diamond LS

Canadian LS

Cornell

Daresbury

HZDR

Mainz

TARLA

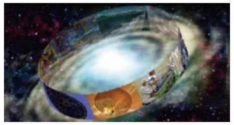
Taiwan PS

Shanghai LS

Pohang LS

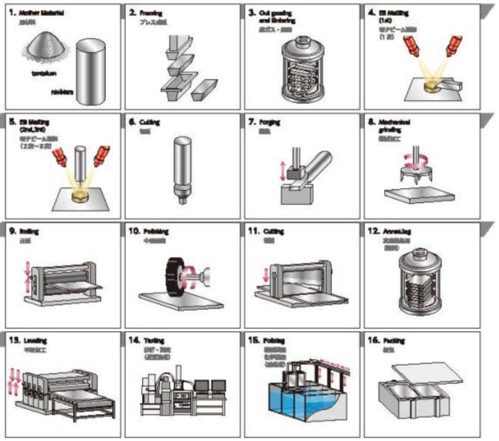
アイスランド
ロシア
カザフスタン
モンゴル
中華人民共和国
日本
アフガニスタン
パキスタン
インド
サウジアラビア
ナイジェリア
エチオピア
タンザニア
アンゴラ
ナミビア
ボツワナ
マダガスカル
南アフリカ
インド洋
オーストラリア
ニュージーランド
北太平洋
南太平洋
カナダ
アメリカ合衆国
メキシコ
北大西洋
ベネズエラ
コロンビア
ペルー
ブラジル
ボリビア
チリ
アルゼンチン
グリーンランド

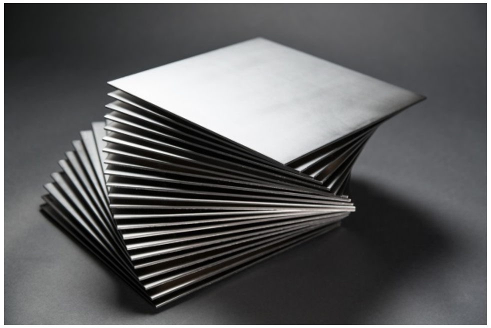
- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- **SRFの世界で活躍する日本の技術**
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに



SRFの世界で活躍する日本の技術（1）：高純度ニオブ材

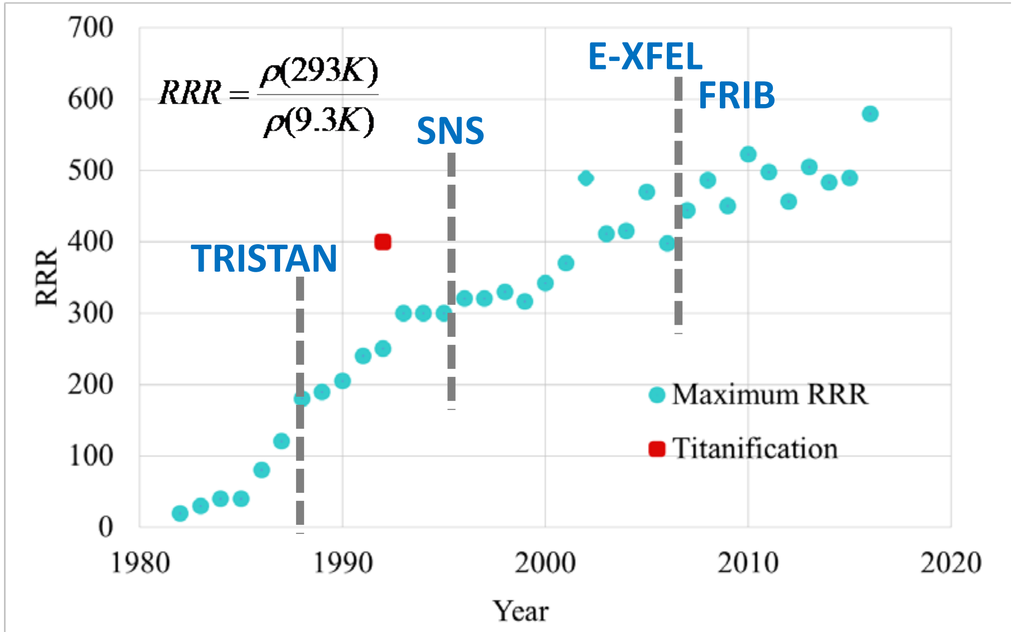
ULTRA HIGH PURITY RARE METAL
TOKYO DENKAI

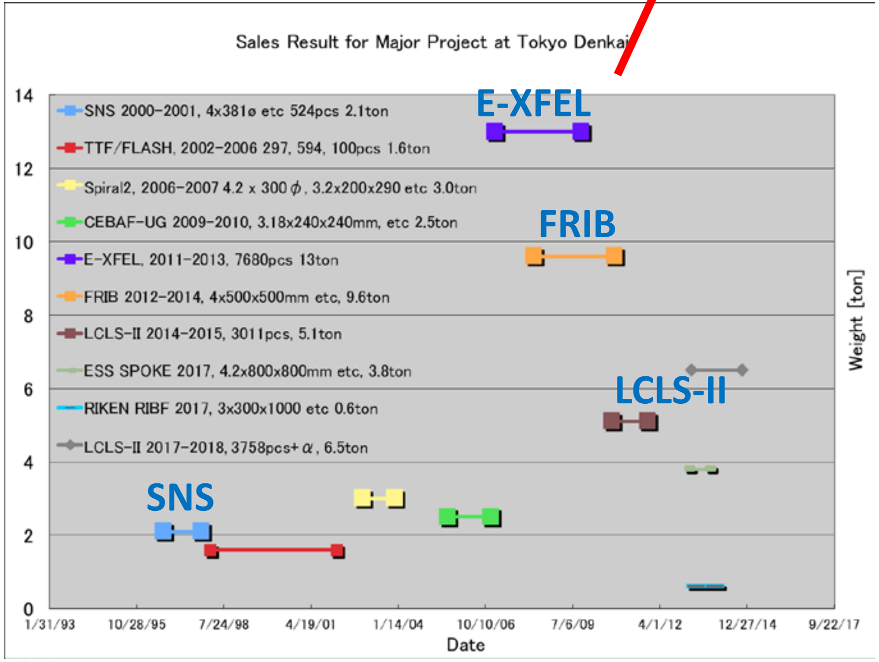

1. Mother Material
tantalum
niobium
2. Pressing
プレス成型
3. Out gassing and Sintering
4. EB Melting (1st)
5. EB Melting (2nd,3rd)
6. Cutting
7. Forging
8. Mechanical grinding
9. Rolling
10. Polishing
11. Cutting
12. Annealing
13. Leveling
14. Testing
15. Polishing
16. Packing



by H. Umezawa (Tokyo Denkai)
in Lecture of ASSCA2017

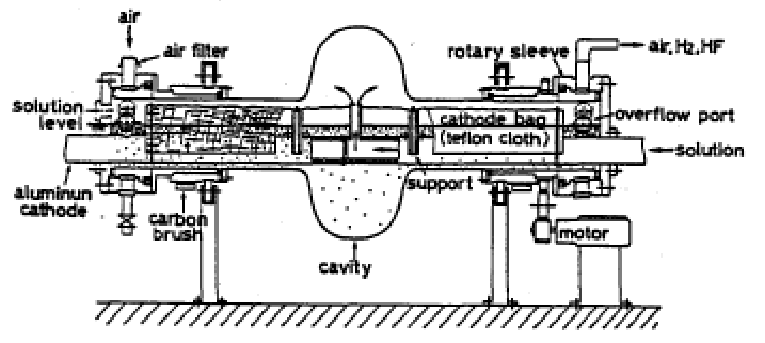
ILC : 230 ton





SRFの世界で活躍する日本の技術（2）： 電解研磨装置

Electro-polishing Device

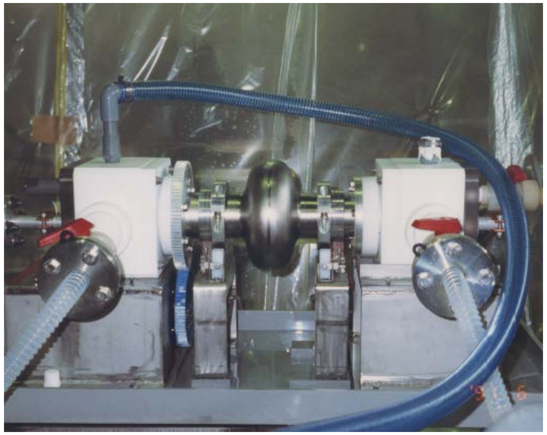

air
air filter
rotary sleeve
air, H₂, HF
solution level
cathode bag (teflon cloth)
overflow port
solution
aluminun cathode
support
carbon brush
motor
cavity

by K. Saito (4th SRF-WS in 1989')

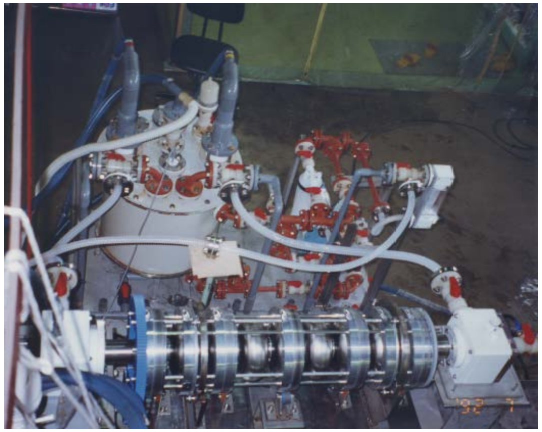
NOMURA PLATING

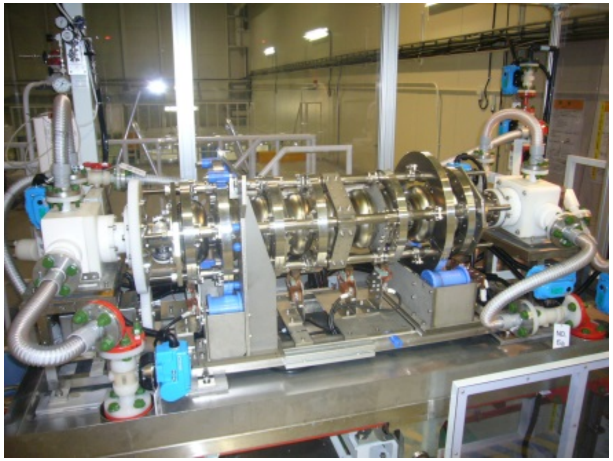
Ⓡ株式会社野村鍍金

1993'

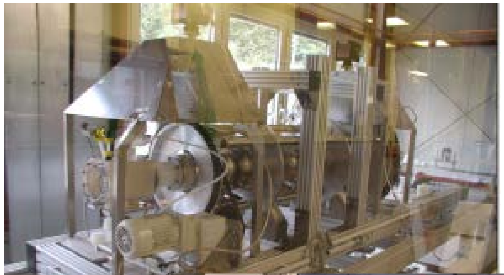


1998'

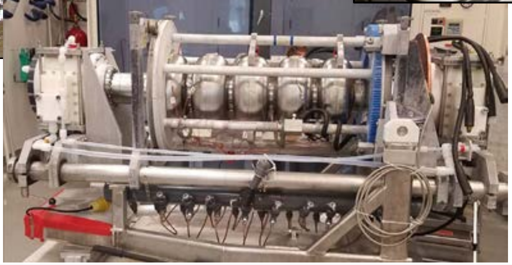




STF/KEK



DESY

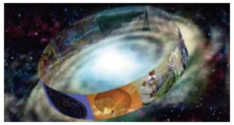


JLab

FNAL/ANL

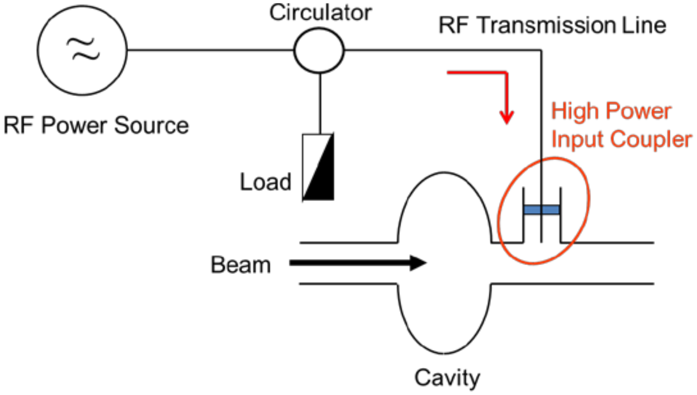
E. ZANON

RI

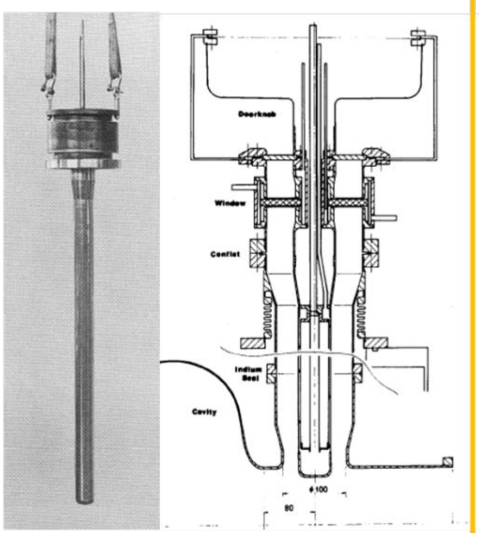


SRFの世界で活躍する日本の技術（3）： 入力カップラー

TOSHIBA ELECTRON TUBES & DEVICES


Circulator
RF Transmission Line
RF Power Source
High Power Input Coupler
Load
Beam
Cavity

低温部のRF窓と銅メッキ技術が重要で低温での熱侵入の低減化が課題。


Doorknob
Window
Conflat
Indium Seal
Cavity
φ100
80

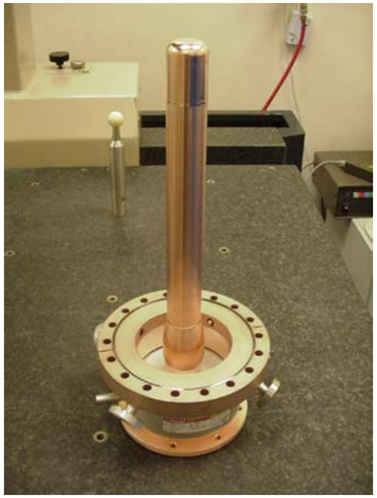
Original design :
508 MHz TRISTAN Input Coupler
S. Noguchi, E. Kako, K. Kubo
(4th SRF-WS, 1989)

972 MHz J-ADS Input Coupler (KEK)

1.3 GHz cERL Injector Input Coupler (KEK)

1.3 GHz STF-1 Input Coupler (KEK)

1.3 GHz STF-2 Input Coupler (KEK)



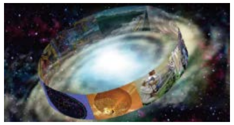
SNS, 805 MHz

CEA, 704 MHz

IBS-QWR, 81.25 MHz

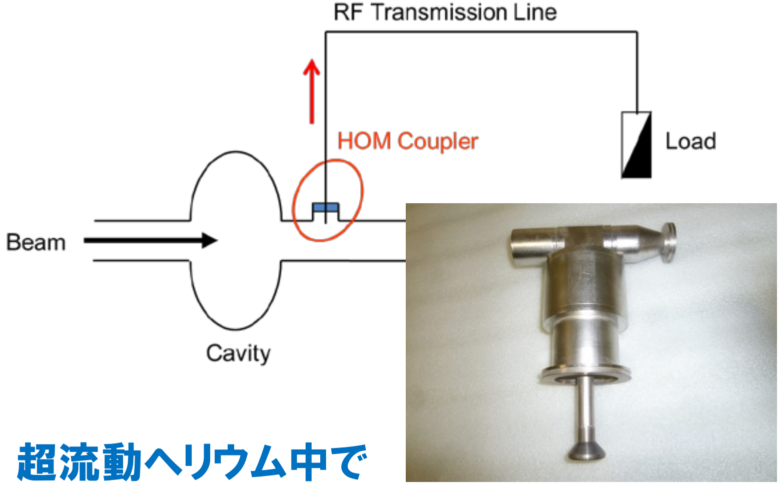
MSU-HWR, 322 MHz

HZB, 1.3GHz

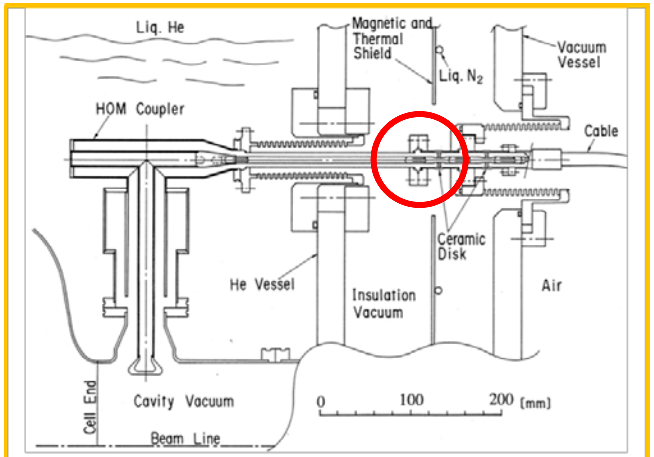


SRFの世界で活躍する日本の技術（4）： RFコネクター

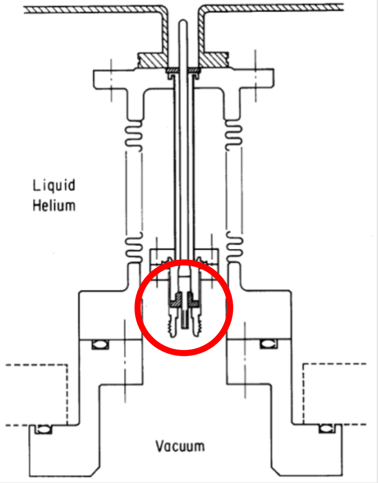
KYOCERA Japan


RF Transmission Line
HOM Coupler
Load
Beam
Cavity

超流動ヘリウム中で使用可能なRFコネクター


Liq. He
Magnetic and Thermal Shield
Liq. N$_2$
Vacuum Vessel
HOM Coupler
Cable
Ceramic Disk
He Vessel
Insulation Vacuum
Air
Cell End
Cavity Vacuum
Beam Line
0
100
200 [mm]

Original design :
508 MHz TRISTAN HOM Coupler
S. Noguchi, E. Kako, K. Kubo
(4th SRF-WS, 1989)


Liquid Helium
Vacuum

Original design :
508 MHz TRISTAN Monitor Coupler
S. Noguchi, E. Kako, K. Kubo
(4th SRF-WS, 1989)

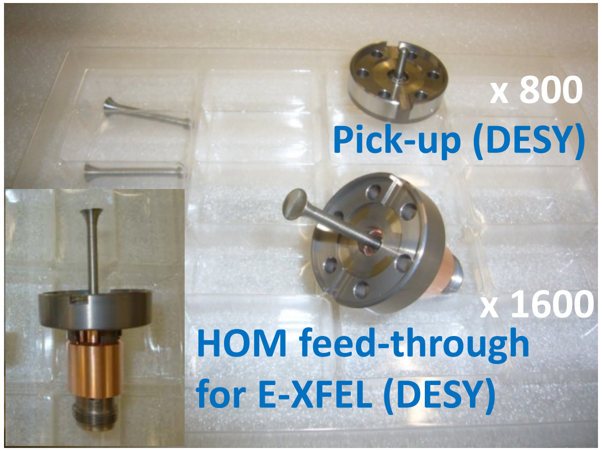
Type-0 (i.c: Kovar, o.c: Kovar)

Type-I (i.c: Mo, o.c: Kovar)

Type-II (i.c: Mo, o.c: Cu)

Type-II'm (i.c: Mo, o.c: Cu) “male pin”

Sapphire feedthrough for cERL injector (KEK)


x 800
Pick-up (DESY)
x 1600
HOM feed-through for E-XFEL (DESY)

SRFの世界で活躍する日本の技術（5）： HOMダンパー

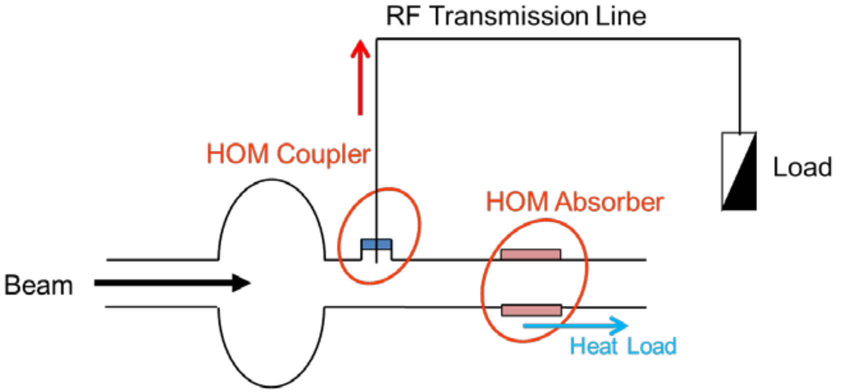
TOSHIBA
Leading Innovation >>>

ERL 用超伝導空洞の HOM ダンパーの開発

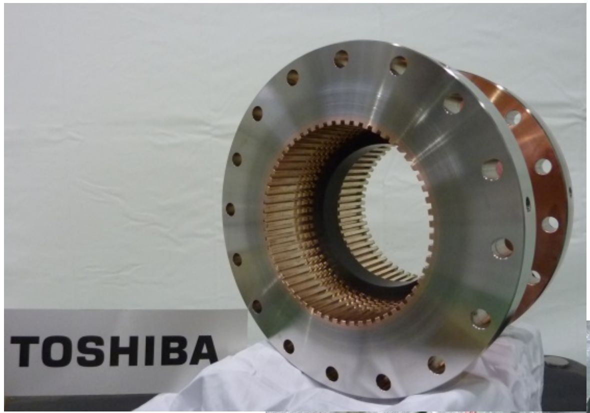
DEVELOPMENT OF HOM ABSORBERS FOR CW SUPERCONDUCTING CAVITIES IN ENERGY RECOVERY LINAC

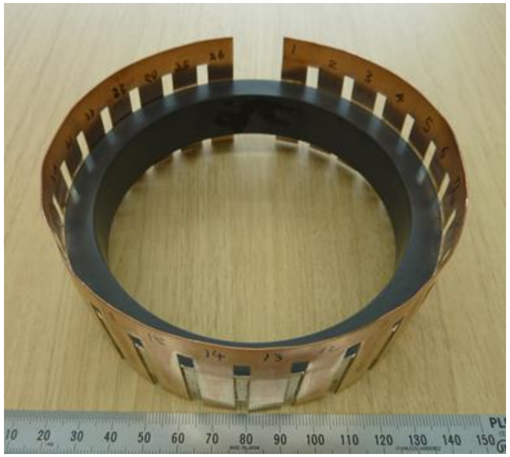
太田智子#, A), 高崎正浩 A), 山田正博 A), 宮本篤 A), 佐藤潔和 A),
許斐太郎 B), 梅森健成 B), 阪井寛志 B), 加古永治 B)

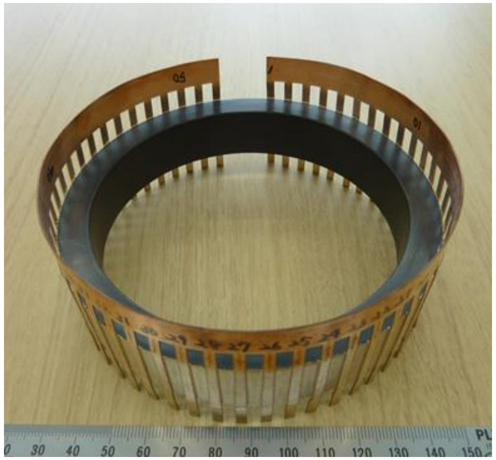
by T. Ota (Toshiba)
in 15th Kasokuki-Gakkai

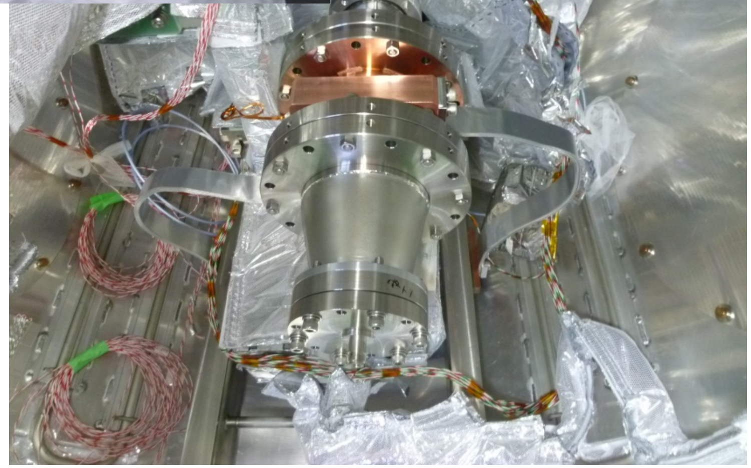

RF Transmission Line
HOM Coupler
Load
HOM Absorber
Beam
Heat Load
Cavity

液体窒素による伝導冷却で
使用可能なRF吸収体

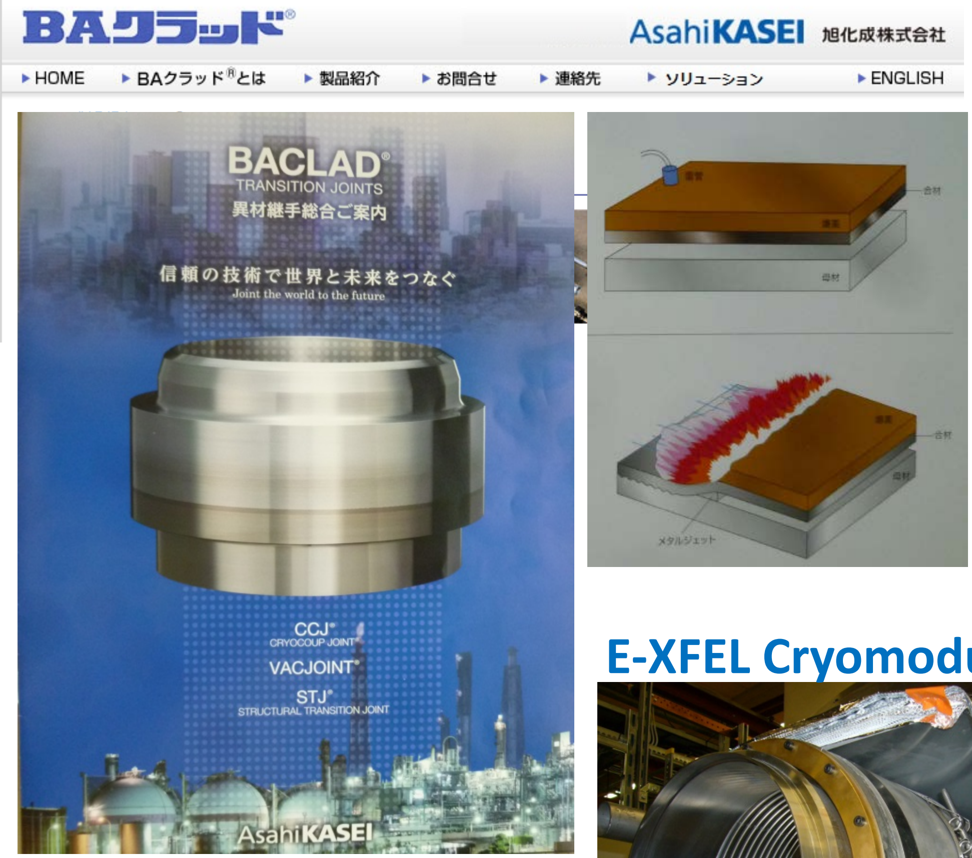








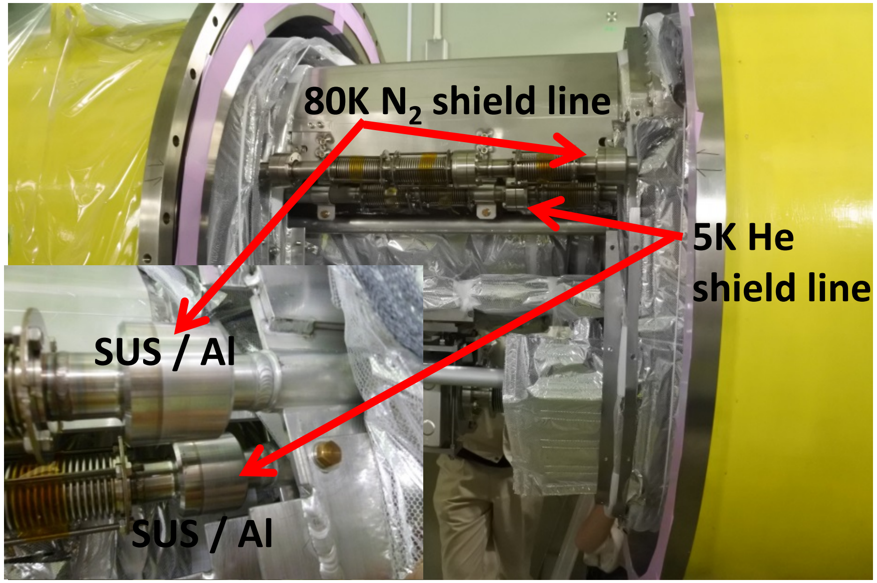
SRFの世界で活躍する日本の技術（6）： 異材接合


BAクラッド®
AsahiKASEI 旭化成株式会社
▸HOME
▸BAクラッド®とは
▸製品紹介
▸お問合せ
▸連絡先
▸ソリューション
▸ENGLISH
BACLAD®
TRANSITION JOINTS
異材継手総合ご案内
信頼の技術で世界と未来をつなぐ
Joint the world to the future
CCJ®
CRYOCOUP JOINT®
VACJOINT®
STJ®
STRUCTURAL TRANSITION JOINT
AsahiKASEI
雷管
合材
爆薬
母材
メタルジェット

(Al / SUS, Ti /SUS)

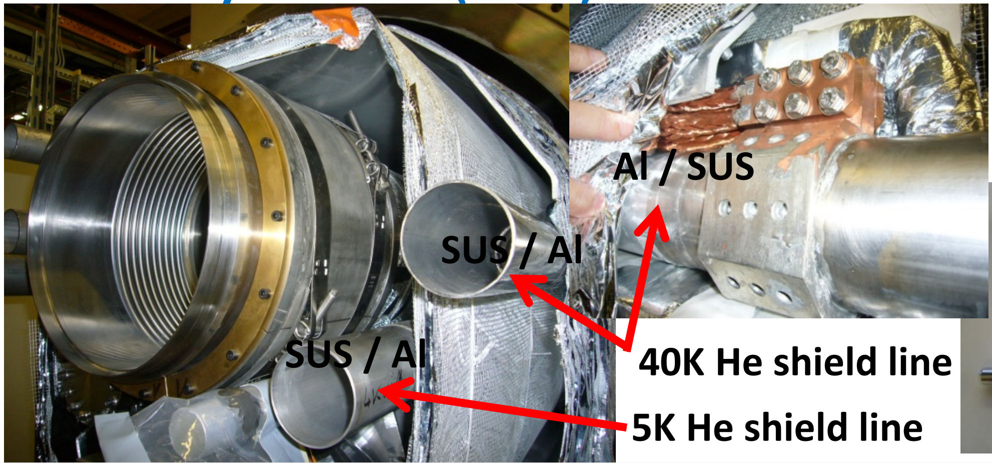
極低温配管で使用可能な機械強度をもつ爆着による異材接合

by S. Kai (Asahi KASEI)


80K N_2 shield line
5K He shield line
SUS / Al
SUS / Al

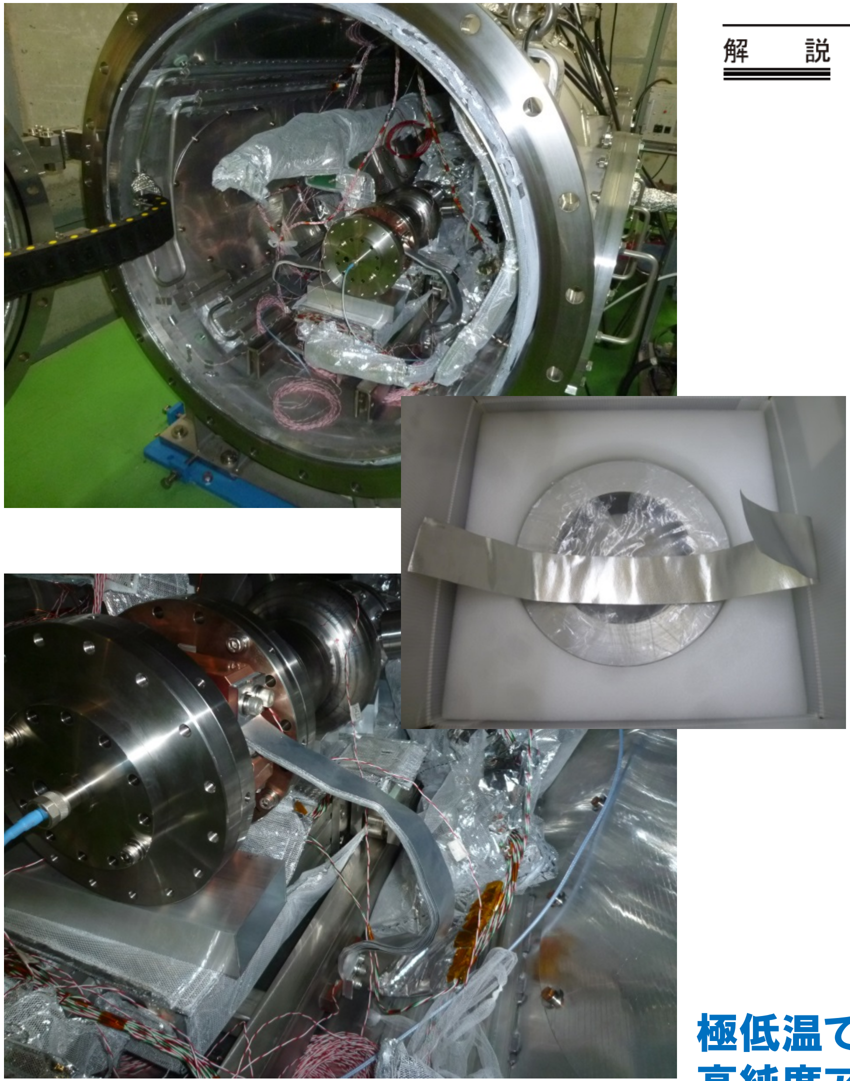
STF-2 Cryomodule (KEK)

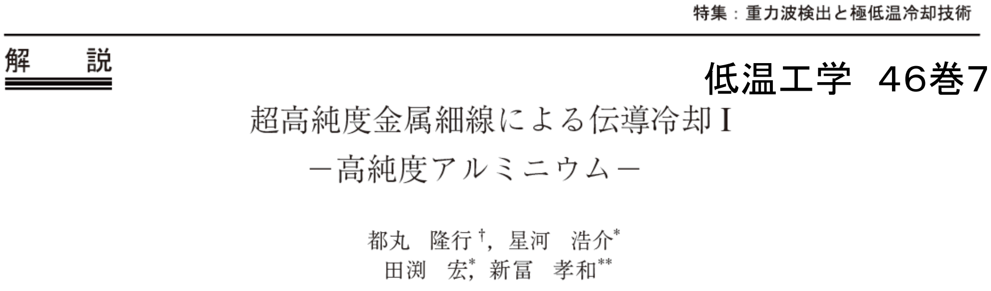
E-XFEL Cryomodule (DESY)


SUS / Al
SUS / Al
Al / SUS
40K He shield line
5K He shield line

Ti /SUS

SRFの世界で活躍する日本の技術（7）：サーマルアンカー





特集：重力波検出と極低温冷却技術

解　説

超高純度金属細線による伝導冷却 I
－高純度アルミニウム－

都丸　隆行†，星河　浩介*
田渕　宏*，新冨　孝和**

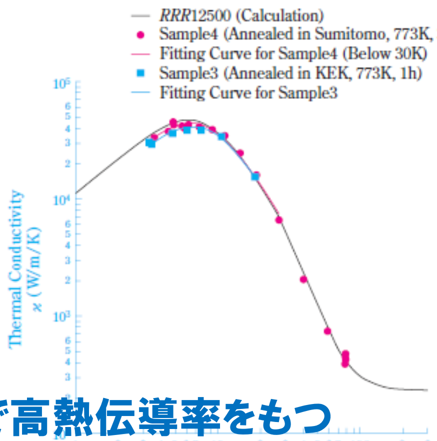
低温工学　46巻7号 (2011)

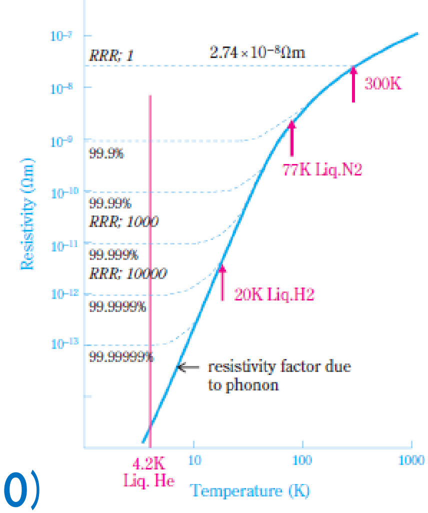
高純度アルミニウムの精製技術と低温物性

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
星河　浩介
田中　一郎*
恵　智裕

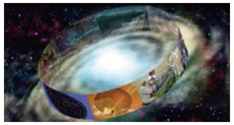
Refining Technology and Low Temperature Properties for High Purity Aluminium

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Basic Chemicals Research Laboratory

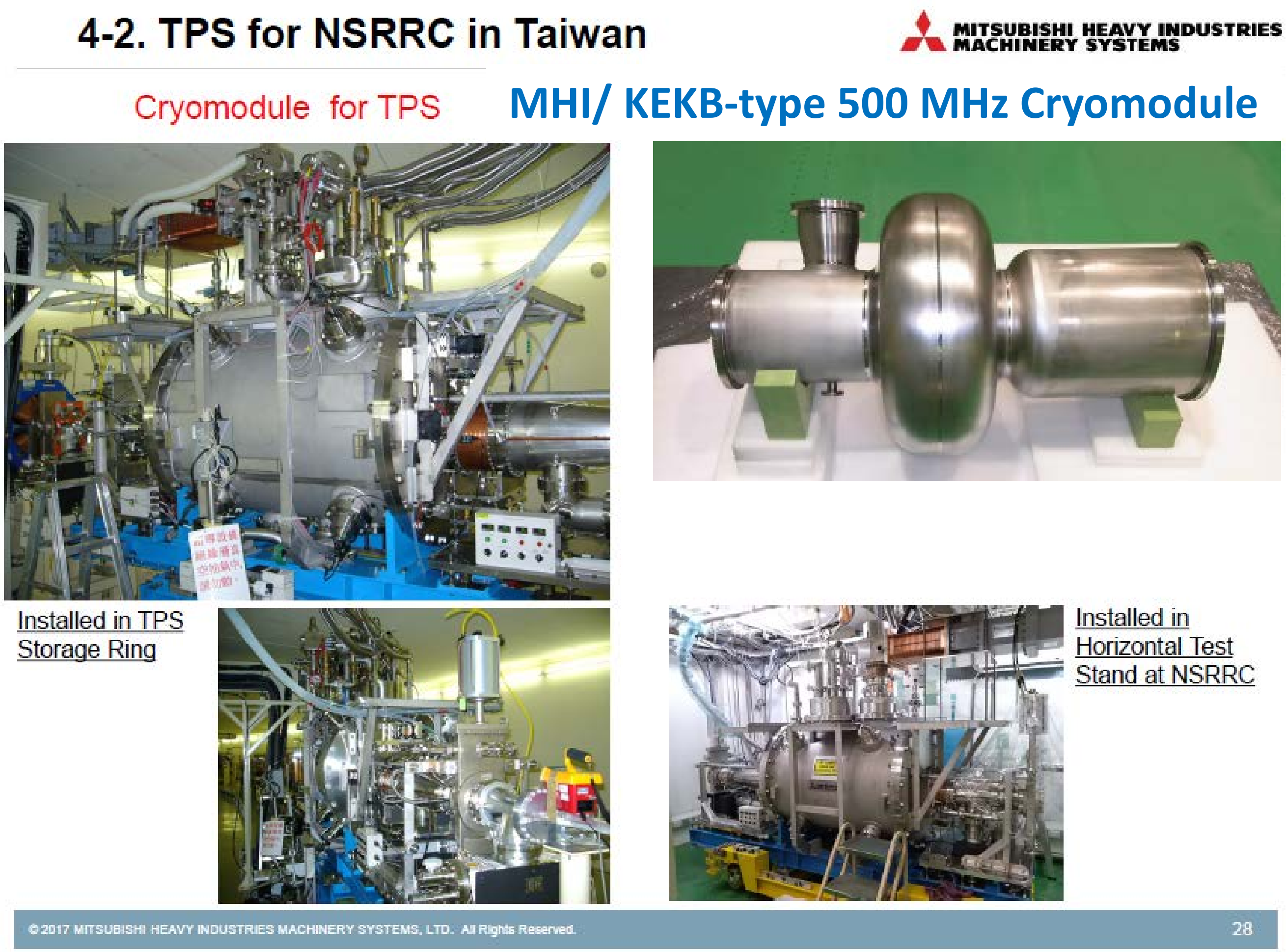




極低温で高熱伝導率をもつ
高純度アルミ材（RRR= 1000~10000）



SRFの世界で活躍する日本の技術（8）:クライオモジュール



4-2. TPS for NSRRC in Taiwan

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES MACHINERY SYSTEMS

Cryomodule for TPS

MHI/ KEKB-type 500 MHz Cryomodule

Installed in TPS Storage Ring

Installed in Horizontal Test Stand at NSRRC

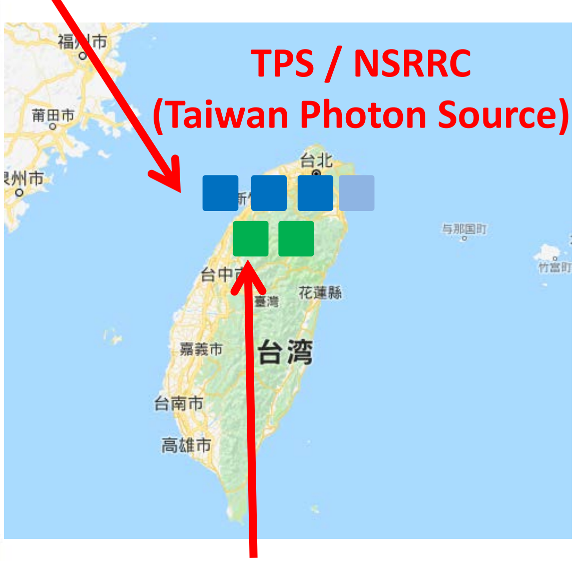
©2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES MACHINERY SYSTEMS, LTD. All Rights Reserved.

28

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

Our Technologies, Your Tomorrow

MHI/ KEKB-type
500 MHz Cryomodule
3 installation and 1 spare



TPS / NSRRC
(Taiwan Photon Source)

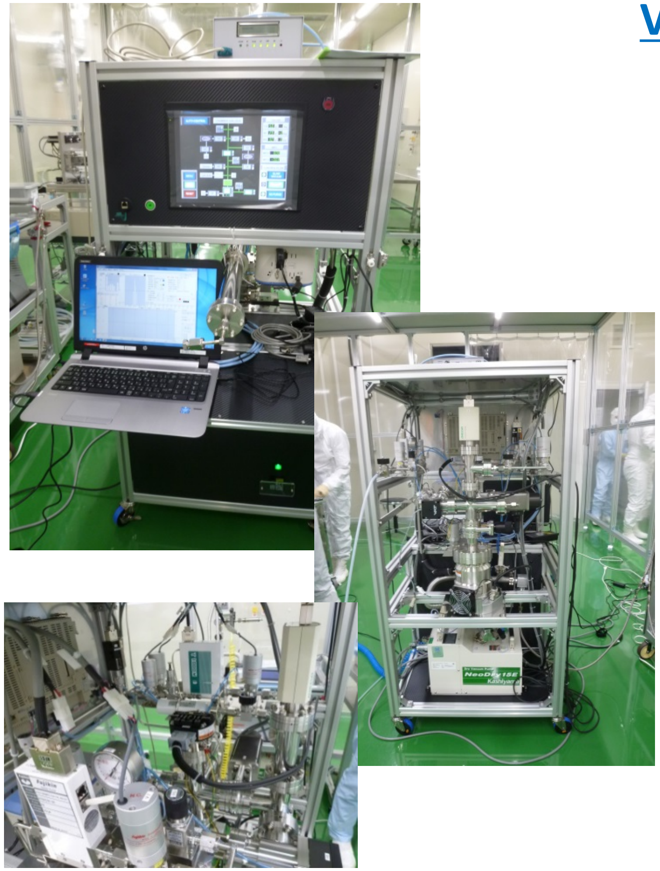
RI/ Cornell-type
500 MHz Cryomodule
2 installation

by K. Sennyu (MHI-MS)
in Lecture of ASSCA2017

SRFの世界で活躍する日本の技術（9）：最新クリーン技術

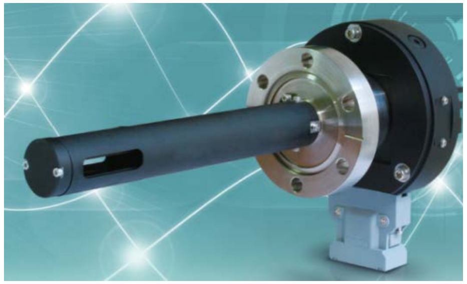
- 性能低下の原因となる電界放出電子の抑制→クリーン環境の強化

Slow Venting/Pumping System



Fujikin 研究・開発のお手伝いをします！ 株式会社アールデック

Vacuum Particle Sensor

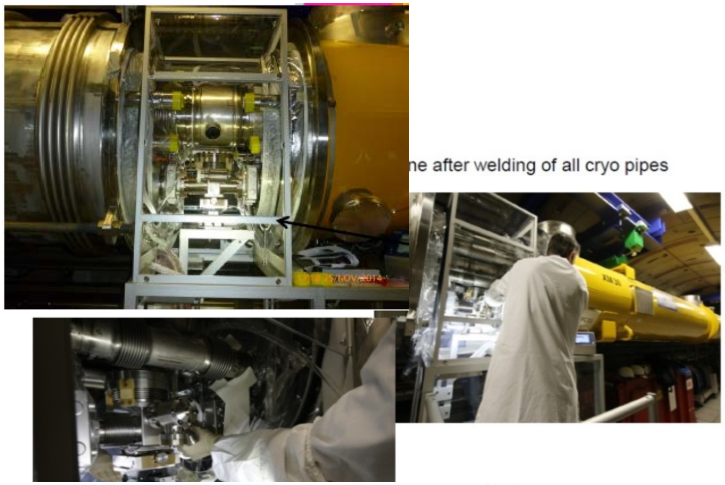


株式会社ウィックス

0.1um Particle Counter

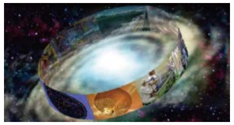
LASAIR III 110

Local Clean-Booth

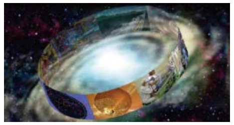

ne after welding of all cryo pipes

Open Clean Bench (KOACH)

興研株式会社
環境エンジニアリングディビジョン

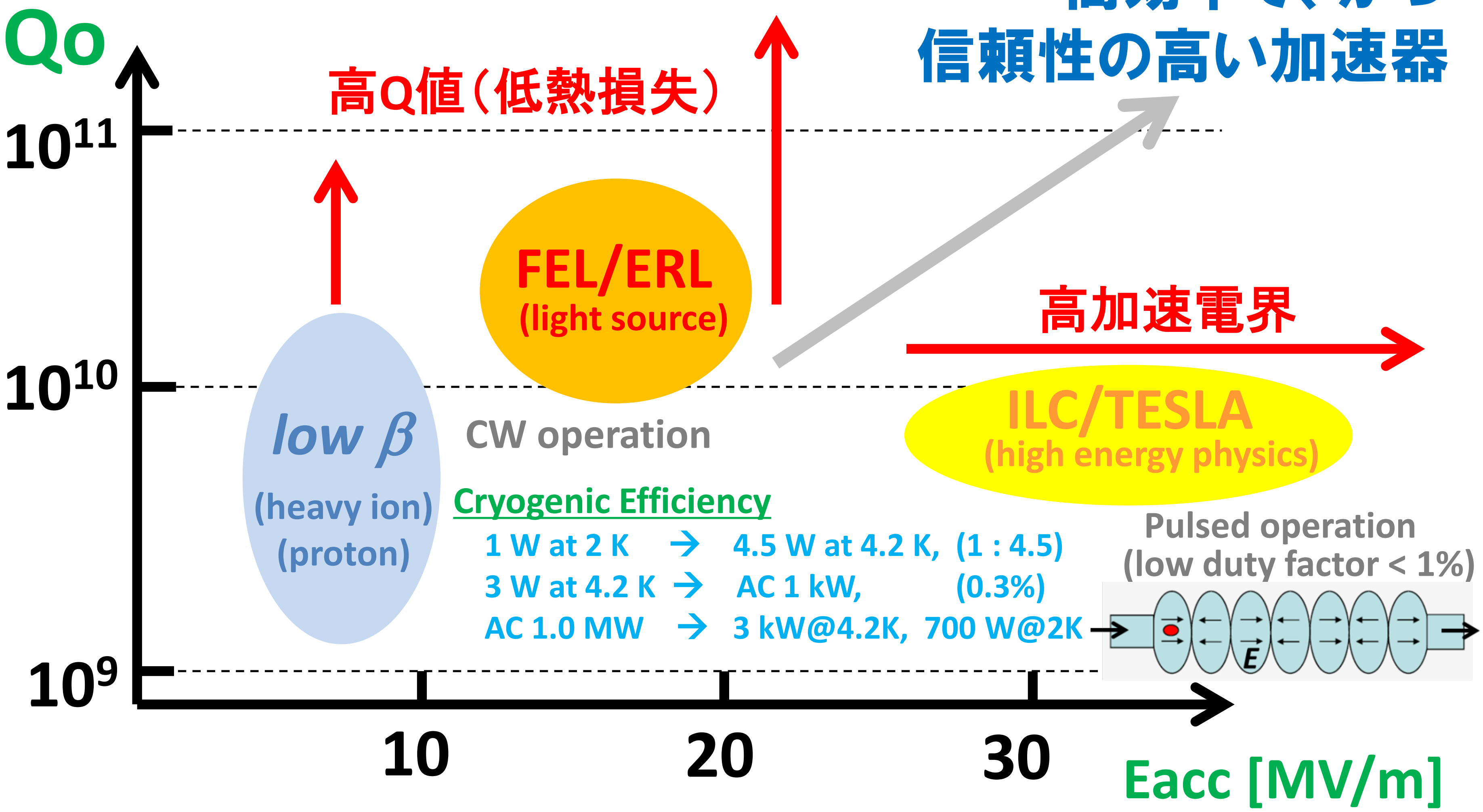


- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- おわりに



高性能な超伝導高周波空洞の研究

$(Q_0 = \omega W_S / P_0 = G/R_s)$



高Q値（低熱損失）

高効率で、かつ
信頼性の高い加速器

FEL/ERL
(light source)

高加速電界

ILC/TESLA
(high energy physics)

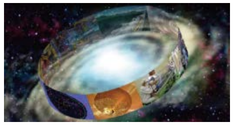
low β
(heavy ion)
(proton)

CW operation

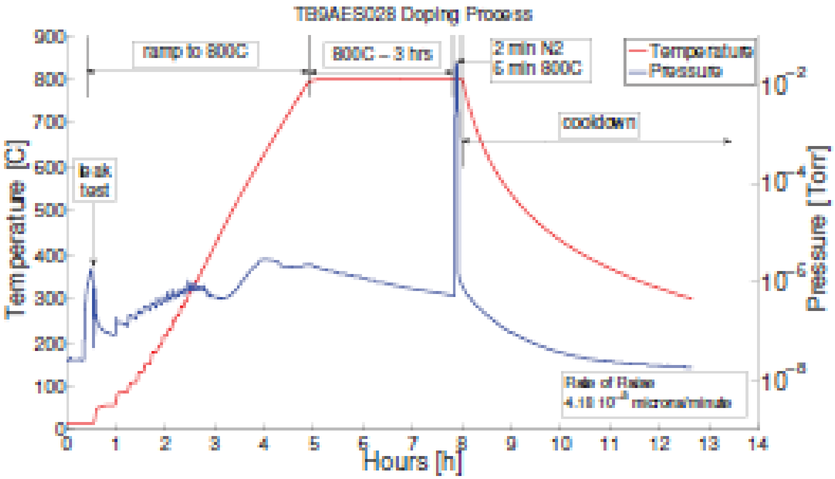
Cryogenic Efficiency

1 W at 2 K → 4.5 W at 4.2 K, (1 : 4.5)
3 W at 4.2 K → AC 1 kW, (0.3%)
AC 1.0 MW → 3 kW@4.2K, 700 W@2K

Pulsed operation
(low duty factor < 1%)

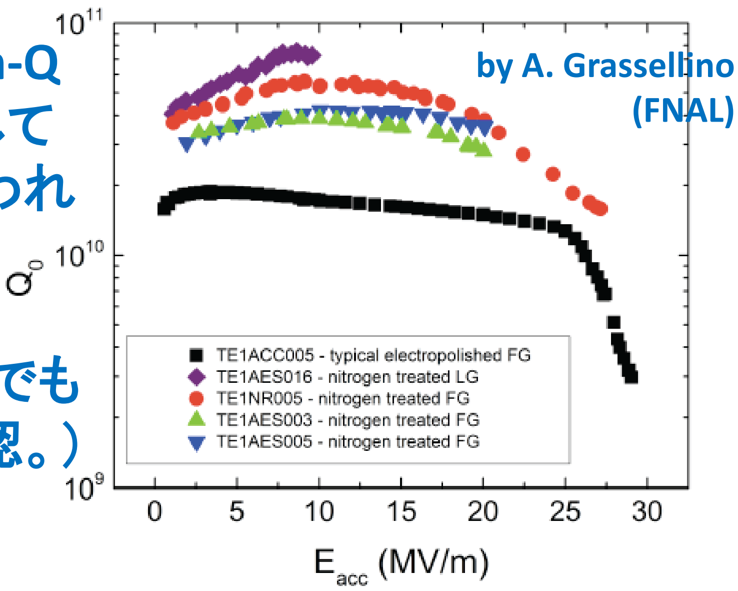


（1） 窒素熱処理 (Nitrogen Doping)



Nitrogen doping

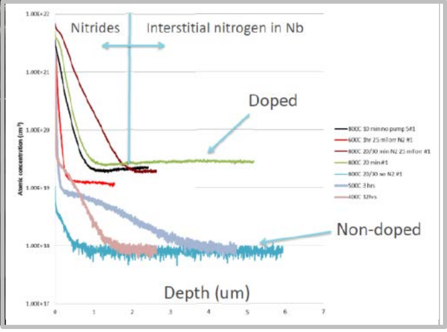
LCLS-II用High-Q空洞処理として実機にて行われている処理法。(FNAL, JLab, Cornell, KEK でも再現性を確認。)

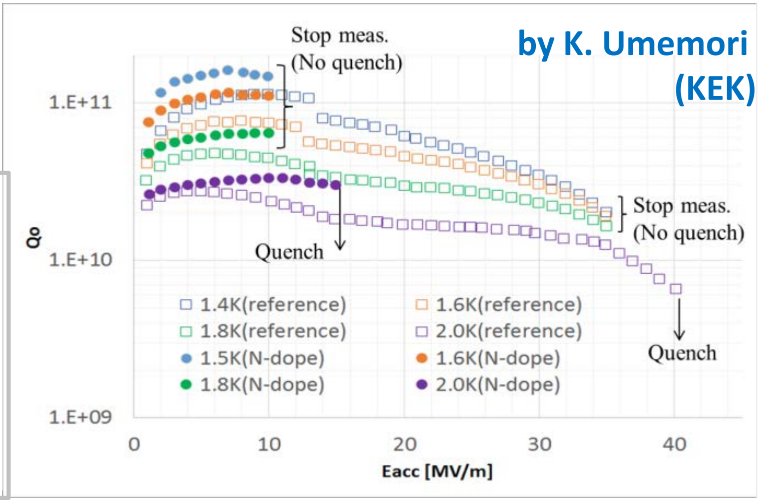


by A. Grassellino (FNAL)

800°C x 3h, N_2: 3 Pa x 2 min, 800°C x 6 min, EP 5µm, HPR

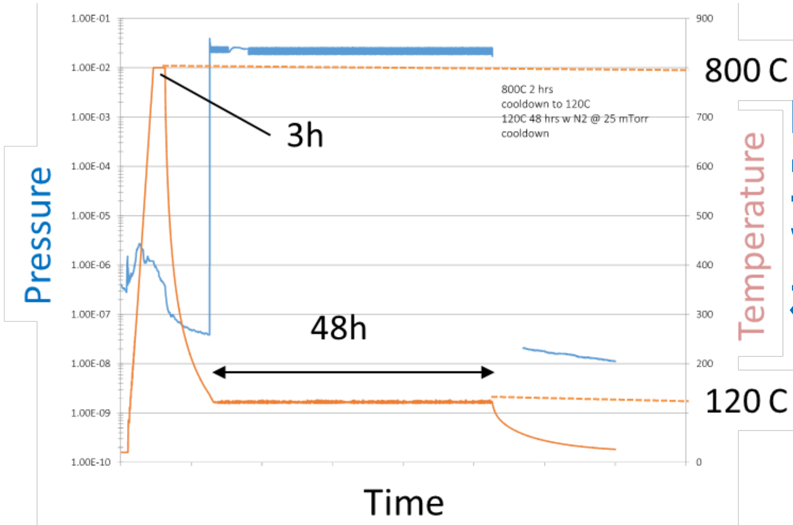
5 µm 表面研磨後の 50 nm の RF surface が重要





by K. Umemori (KEK)

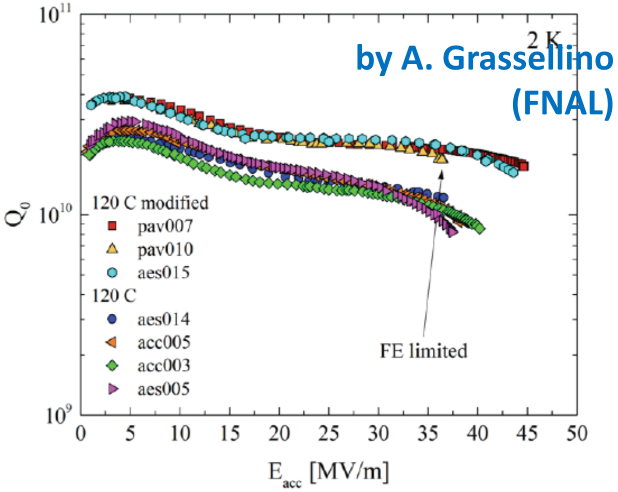
（2） 窒素熱処理　(Nitrogen Infusion)



Nitrogen infusion

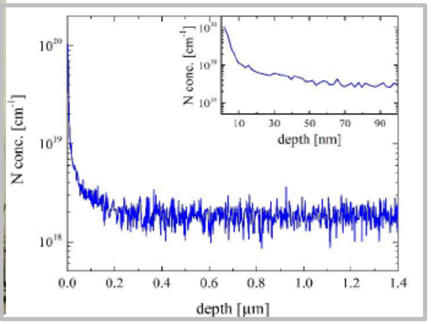
800°C x 3h, N_2: 3 Pa at 120°C x 48h, no EP, HPR

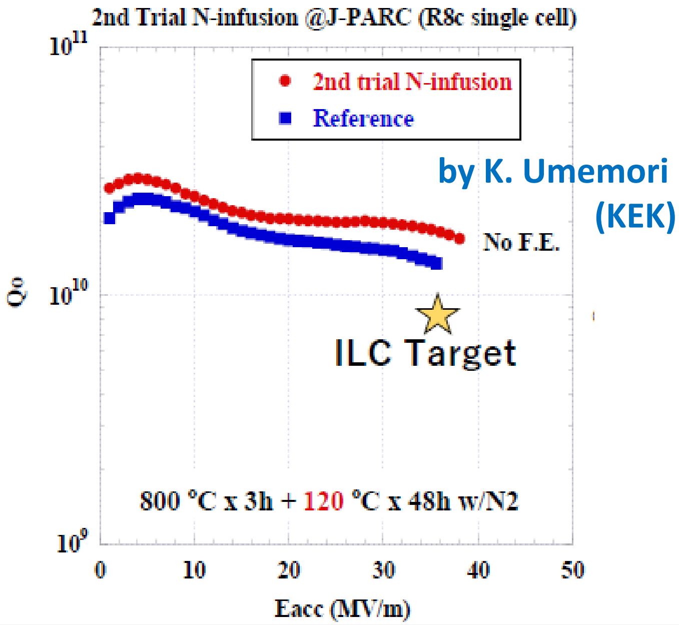
ILC用High-Q/High-G空洞処理として有望であるが、再現性の確認試験を継続中。



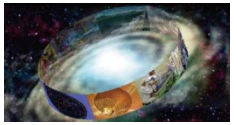
by A. Grassellino (FNAL)

表面研磨なしでの
50 nm の RF surface
が重要



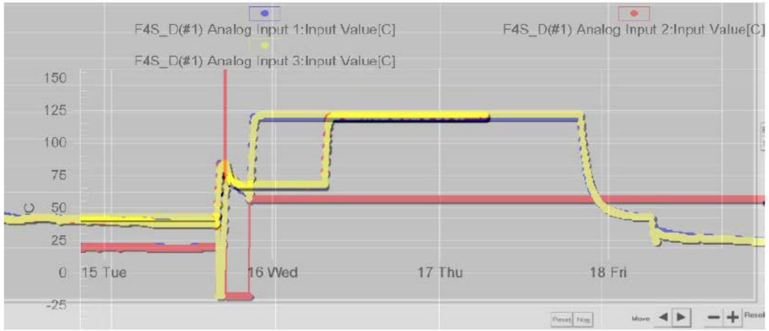


by K. Umemori (KEK)



（3） 窒素のいらない熱処理 (75ºC Baking)

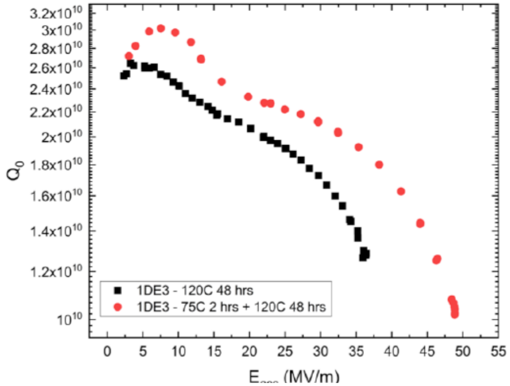
Anomaly found during the low T bake



- A thermocouple went faulty and oven went to standby
- Cavity lingered around 75C for about 2 hours, then resumed the 120C 48 hours

1DE3 – the first 49 MV/m cavity

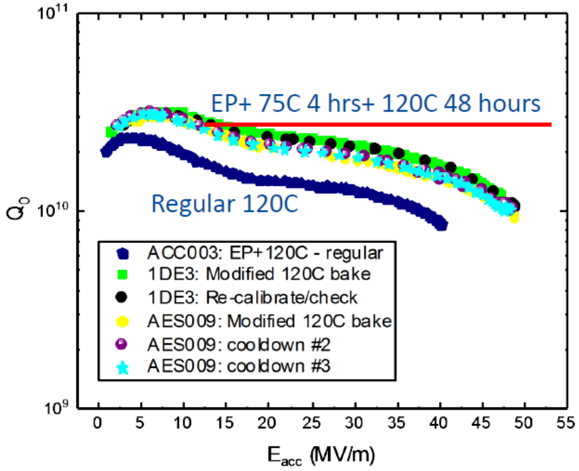
- Cavity (fine grain) from DESY colleagues was prepared for baseline test before infusion, EP 60 microns + regular 120C bake (no nitrogen, low T oven)
- Results were pretty surprising/puzzling



**TTC @ RIKEN,
2018, June 26
by A. Grassellino
(FNAL)**

A. Grassellino et al, https://arxiv.org/abs/1806.09824

Repeated on second cavity TE1AES009 (fine grain, AES, WC)

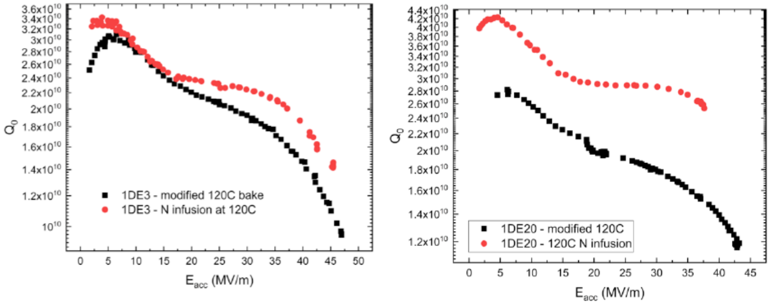


A. Grassellino et al, https://arxiv.org/abs/1806.09824

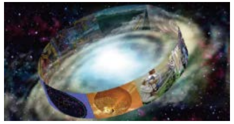
KEKで再現性の確認試験を行っているが、今のところ成功例はなし。

1DE3 and 1DE20

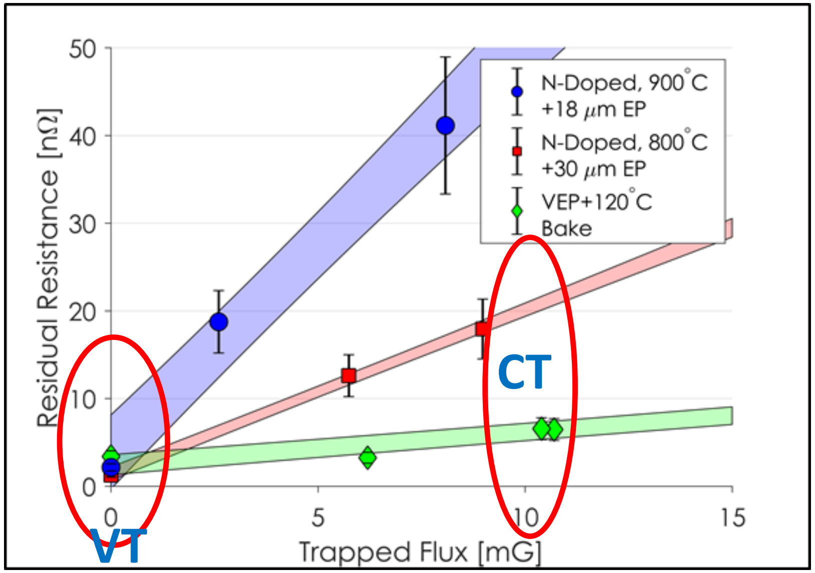
75C/120C with regular oxide (low T oven) versus with N infusion (high T furnace)



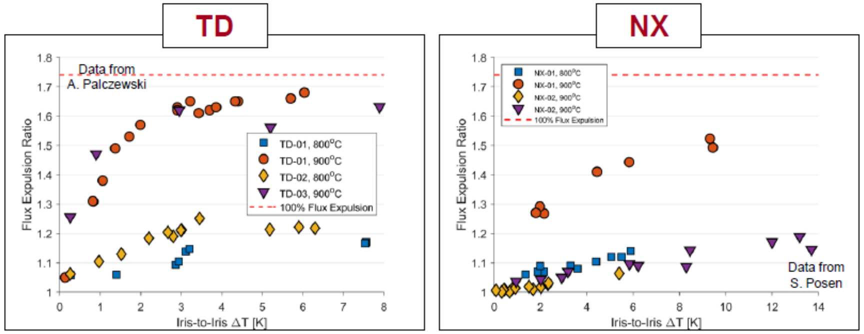
Fine grain improved little in Q, less gradient (however had FE)
Large grain improved substantially in Q, but decreased Eacc
(which is typically seen for infusion on LG)



（4） 窒素熱処理による空洞性能向上の評価



Flux Expulsion in Original Material

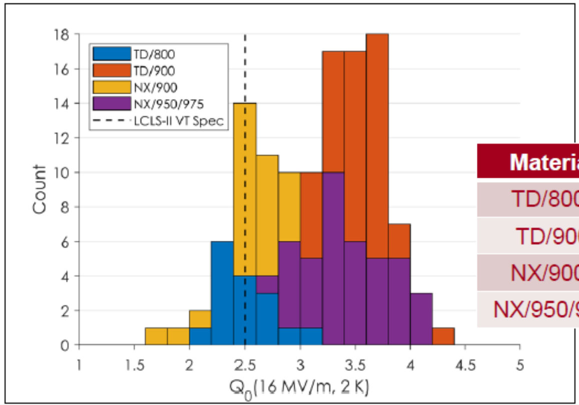


- TD material shows poor flux expulsion after 3 hours at 800°C
- Improved to near perfect when temperature raised to 900°C

- NX material shows poor flux expulsion after 3 hours at 800°C
- 900°C did not significantly improve flux expulsion

TTC @ RIKEN, 2018, June 26 by D. Gonnella (SLAC)

Q_0 by Material in VT

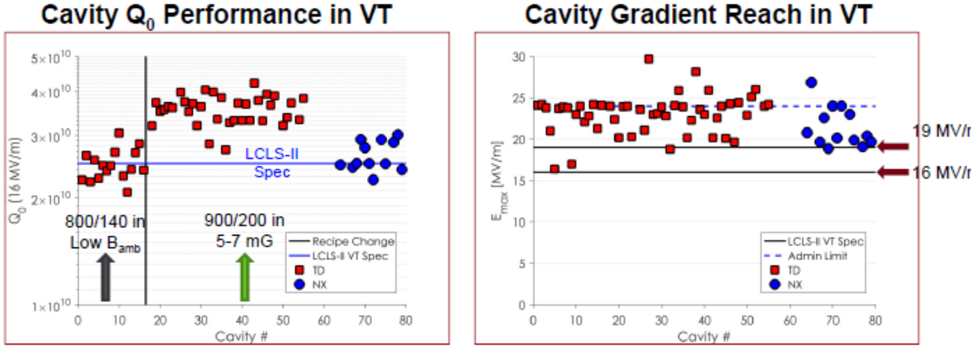


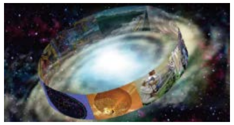
Large spread in Q_0 in vertical test due to differences in heat treatments and material

Material	$\langle Q_0 \rangle$ at 16 MV/m, 2K
TD/800*	2.5×10^{10}
TD/900	3.3×10^{10}
NX/900*	2.6×10^{10}
NX/950/975	3.3×10^{10}

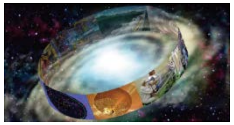
*TD/800 tested in lower magnetic fields than NX/900

The technology has shown significant capabilities beyond our initial consideration.

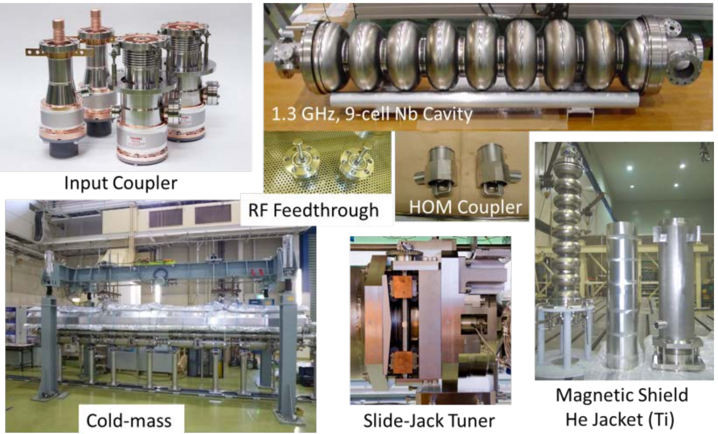




- はじめに
- 超伝導空洞（SRF）とその応用
- 世界における超伝導加速器＆計画
- SRFの世界で活躍する日本の技術
- 高性能な超伝導空洞の最近の研究
- **おわりに**



ILC : International Linear Collider (1)

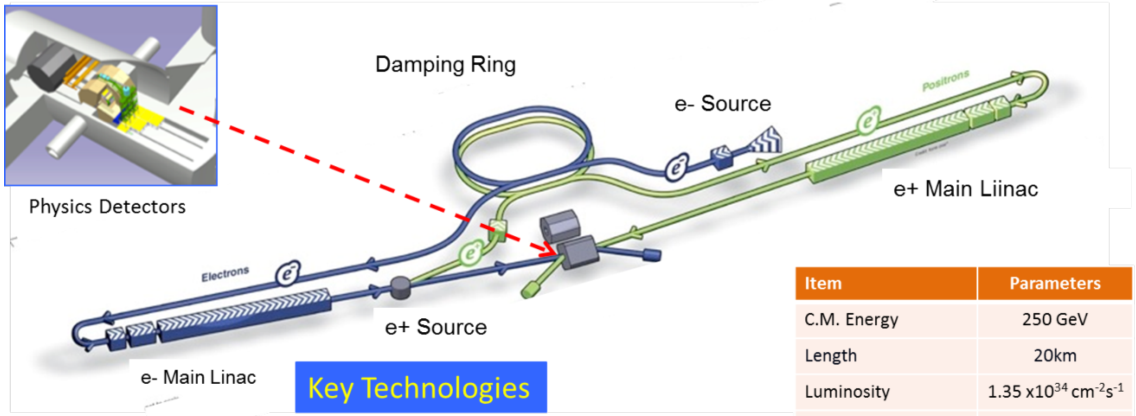

Input Coupler
1.3 GHz, 9-cell Nb Cavity
RF Feedthrough
HOM Coupler
Cold-mass
Slide-Jack Tuner
Magnetic Shield
He Jacket (Ti)

Main components for STF cavity system developed at KEK

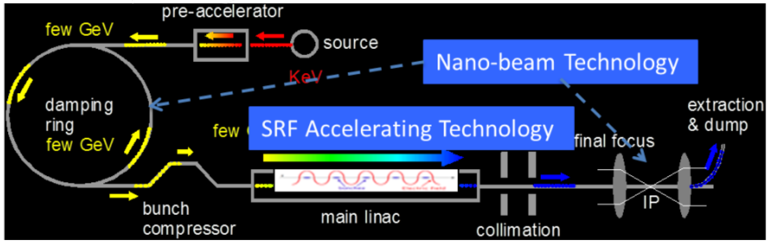
- **Energy : 500 GeV → 250 GeV**
- **Length : 30 km → 20 km**

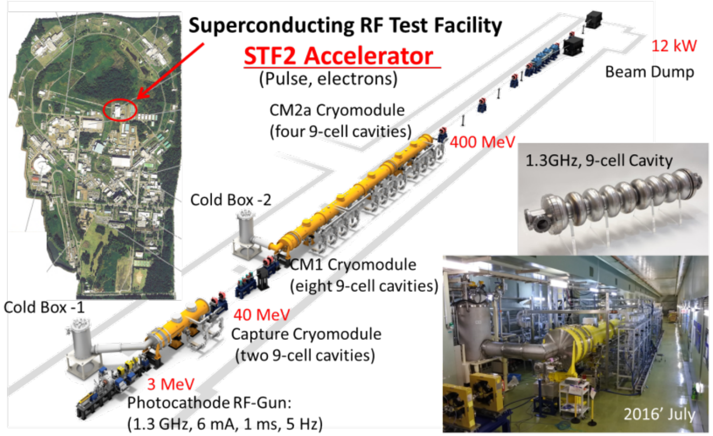
ILC250 Acc. Design Overview

by S. Michizono (KEK)


Physics Detectors
Damping Ring
e- Source
Positrons
e+ Main Liinac
Electrons
e+ Source
e- Main Linac
Key Technologies

Item	Parameters
C.M. Energy	250 GeV
Length	20km
Luminosity	1.35 x10^{34} cm^{-2}s^{-1}
Repetition	5 Hz
Beam Pulse Period	0.73 ms
Beam Current	5.8 mA (in pulse)
Beam size (y) at FF	7.7 nm@250GeV
SRF Cavity G. Q_0	31.5 MV/m (35 MV/m) Q_0 = 1x10^{10}


pre-accelerator
few GeV
source
KeV
Nano-beam Technology
damping ring
few GeV
few
SRF Accelerating Technology
extraction & dump
final focus
IP
bunch compressor
main linac
collimation


Superconducting RF Test Facility
STF2 Accelerator
(Pulse, electrons)
12 kW
Beam Dump
CM2a Cryomodule
(four 9-cell cavities)
400 MeV
1.3GHz, 9-cell Cavity
Cold Box -2
CM1 Cryomodule
(eight 9-cell cavities)
Cold Box -1
40 MeV
Capture Cryomodule
(two 9-cell cavities)
3 MeV
Photocathode RF-Gun:
(1.3 GHz, 6 mA, 1 ms, 5 Hz)
2016' July

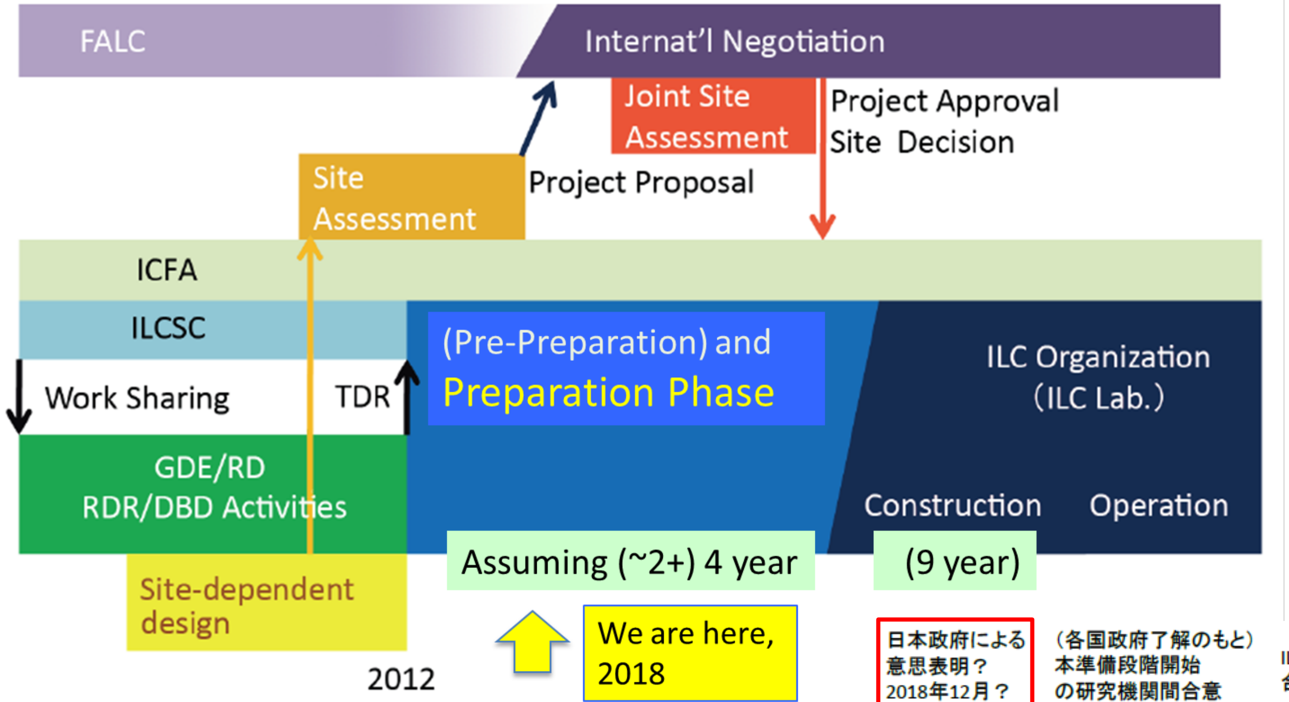
- **~ 9000 x 1.3GHz, 9-cell cavities for 250 GeV**
- **~ 850 Cryomodules**

Beam operation of SRF-2 Accelerator (2+12, 9-cell cavity) will be started in March, 2019.

ILC : International Linear Collider (2)

ILC Time Line: Progress and Prospect

by S. Michizono (KEK)



FALC

Internat'l Negotiation

Joint Site Assessment

Project Approval
Site Decision

Site Assessment

Project Proposal

ICFA

ILCSC

Work Sharing

TDR

(Pre-Preparation) and
Preparation Phase

ILC Organization
(ILC Lab.)

GDE/RD
RDR/DBD Activities

Construction

Operation

Site-dependent design

Assuming (~2+) 4 year

(9 year)

We are here, 2018

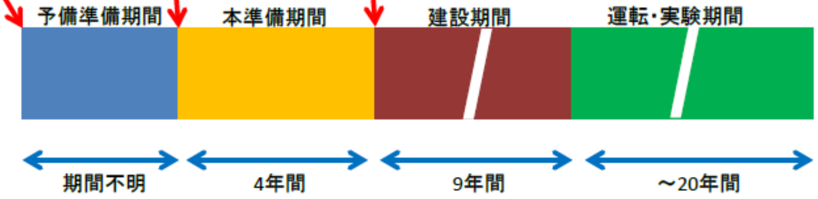
2012

日本政府による
意思表明？
2018年12月？

（各国政府了解のもと）
本準備段階開始
の研究機関間合意

ILC建設の政府間
合意（条約）

by M. Yamauchi (KEK)

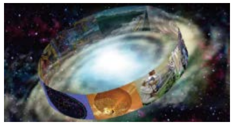


2018' July 04

ILCに関する有識者会議 ：
ILC計画の見直しを受けた
議論のまとめを公表

2018' Aug. – Oct.

日本学術会議 ：
国際リニアコライダー計画
見直し案に関する検討委員会



世界における大型超伝導加速器＆計画のまとめ

1.3 GHz, 9-cell cavities (TESLA-type cavity)

Accelerator	Lab. / Country	Purpose	Energy	Number of Cavity	Status
E-XFEL	DESY / EU	X-FEL	17.5 GeV	800	Operation
LCLS-II	SLAC / USA	X-FEL	4 GeV / CW	280	Construction
SHINE	SINAP / China	X-FEL	8 GeV / CW	600	Construction
MaRIE	LANL / USA	X-FEL	12 GeV	460	Plan
ILC	International	e^-e^+ Collider	250 GeV x2	9000	Plan

Low-β cavities (QWR, HWR, Spoke, Elliptical)

Accelerator	Lab. / Country	Particle	Number of Cavity	Status
Spiral-2	GANIL /France	Heavy ions	12+14 QWR	Operation
FRIB	MSU / USA	Heavy ions	16+104 QWR, 72+148 HWR	Construction
RAON	IBS / Korea	Heavy ions	28 QWR, 76 HWR, 69+138 Spoke	Construction
ESS	Lund / EU	Proton	26 Spoke, 36+84 Elliptical	Construction
CiADS	Huizhou/China	Proton	12+5 HWR, 56 Spoke, 32+85 Ellip.	Plan
PIP-II	FNAL / USA	Proton	8 HWR, 16+35 Spoke, 33+24 Ellip.	Plan

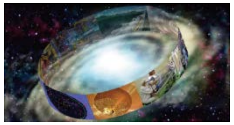
ま と め

- 超伝導空洞は加速・減速装置としての役割の他に、SRF-Gun, Deflecting, 3^{rd} Harmonics など広範囲への応用を目的として、開発が進行中である。

- 超伝導空洞を数百台規模で量産する超伝導加速器として (E-XFEL, LCLS-II, SHINE, FRIB, RAON, ESS) の建設が世界各地で現在進行中であり、さらに将来の大型超伝導加速器として(CEPC, FCC, ILC)が計画されている。

- 超伝導空洞システムに関連する日本の技術は、世界の超伝導加速器において多大なる貢献をしている。

- 超伝導空洞の性能向上のために、高加速電界 (High-G)・高Q値 (High-Q) の研究開発が活発に行われている。



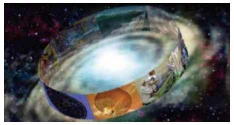
参考文献

[1] Hasan Padamsee, “50 years of success for SRF accelerators - a review”, **Supercond. Sci. Technol.** 30 (2017) 053003.

[2] Anne-Marie Valente-Feliciano, “Superconducting RF materials other than bulk niobium: a review”, **Supercond. Sci. Technol**. 29 (2016) 113002.

[3] E. Kako, “Technologies for Superconducting RF Cavities, (1) & (2)”, **KASOKUKI** (Journal of the Particle Accelerator Society of Japan), (1) Vol.13, No.1 (2016) p2-11, (2) Vol.13, No.2 (2016) p70-79. *(in Japanese)*

[4] E. Kako, “Development of Superconducting Cavities for ILC”, **TEION KOGAKU** (Journal of the Cryogenic Society of Japan), 01/2013; 48(8): (2013) p415-425. *(in Japanese)*



謝　辞

ULTRA HIGH PURITY RARE METAL
TOKYO DENKAI
梅澤 裕明 氏

TOSHIBA
Leading Innovation >>>
太田 智子 氏

NOMURA PLATING
®株式会社野村鍍金
鈴木 隆房 氏

AsahiKASEI 旭化成株式会社
甲斐 章一郎 氏

KYOCERA Japan
吉住 浩之 氏

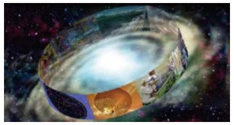
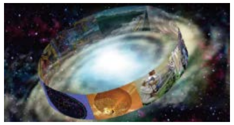
TOSHIBA ELECTRON TUBES & DEVICES
入倉 正男 氏

MITSUBISHI
HEAVY INDUSTRIES, LTD.
Our Technologies, Your Tomorrow
仙入 克也 氏

住友化学
白石 瑞樹 氏

Fujikin®
佐々木 尚美 氏

研究・開発のお手伝いをします！
株式会社アールデック
飯村 和広 氏

ご清聴どうもありがとうございました。