Summer Challenge 2007 21 – 29 August 2007 @ KEK 演習9:「超伝導空洞用ニオブの材料評価」 講義ノート

講師

齋藤	健治
佐伯	学行
古田	史生

TA

福山	高志
齋藤	希望

1

実験講座 9

"超伝導空洞用ニオブの材料評価"

概要

高周波を使って荷電粒子を加速する装置が高周波加速空洞である。この加速空洞には、銅を使ってつくる方法(Warm Technology)とニオブ等の超伝導材料から作る(Cold Technology)二つがある。超伝導材料で作った空洞を超伝導空洞と呼び、4.2Kの液体ヘリウムないしは2Kの超流動液体ヘリウムで冷却して運転する。超伝導空洞は、表面抵抗が銅空洞よりも百万倍小さく、荷電粒子を効率よく加速できる特徴を備えている。KEKはトリスタン計画(約20年前)で世界に先駆けこの技術の大規模応用に成功し、それ以来世界をリードしている。超伝導空洞の製作には、色々な"超"先端技術が必要である。その一つとして、超伝導材料の工業的生産技術が重要課題である。現在超伝導空洞の材料としてニオブ純金属が使われている。その品質として高純度で超伝導臨界磁場の高い物が要求される。本講座ではニオブ材の超伝導物性の測定を経験しながら、高性能の空洞を製作するための材料評価法を体験学習する。また、高品位のニオブ材料製作に日本の企業が如何に頑張っているかを伝えたい。この講座はまさに超伝導空洞製作技術の最前線である。材料評価として、以下の二つを行う。

1) RRRの測定による高純度ニオブ材の評価

2) 超伝導臨界磁場(Hc)の測定による高周波臨界磁場の評価

これらの測定原理は超伝導の基礎であり、極めて教育的であるはず。しかし、ここから得られる情報は、"世界最高性能の超伝導空洞作り"で最も重要なことである。

本実験講座では冷却時間など待ち時間が多いので、その時間を利用してニオブ材の製作法、超伝導空洞の設計・製作 法、荷電粒子の高周波加速原理(黒川先生の講義があるので省くかもしれないが)、国際リニアーコライダー(ILC)に向け た我々の開発戦略・開発状況などにも触れたいと思う。限られた時間で全てを消化できないが、講義ノートにそれらを掲 載しておくので暇な時見ていただければ幸いである。尚、もっと詳細を知りたい人には、以下のWeb site を見てください。 ILCについて1000ページの情報があります。

2

http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG5notes/2007SaitoNoteTokyoUniv/

K.Saito 超伝導空洞用ニオブの材料評価

内容

- ・ 実験準備講義
 超伝導入門 RRRの測定 超伝導磁気特性測定 演習問題
- 実験合間の講義 なぜニオブ超伝導物性の測定講義をKEKでやるのか?

次世代の高エネルギー物理とILC計画 AP.1 高エネルギー物理と加速器 AP.2 粒子加速原理 AP.3 ILC加速器計画 AP.4 ニオブ材の製作法 AP.5 超伝導空洞の設計・製作法 AP.6 ILCに向けた日本の高電界空洞戦略

Electron-electron interaction through lattice in superconducting state

Electron/electronはクーロン斥力相互作用するが、latticeを介した相互では 引力となり得る。→→→ 超伝導



超伝導現象1:遷移温度で零抵抗



K.Saito





超伝導空洞内表面の色々な欠陥





Surface defects, holes can also cause TB









超伝導空洞性能を制限する"Thermal Instability"



Thermal instabilityを抑制するにはHigh RRR



熱伝導度測定にみるCouper pair凝縮



Thermal conductivity comparison with NC and SC



超伝導空洞用ニオブの材料評価

11

Calculation of thermal conductivity based on Quantum mechanics

¬−1

K.Saito

Linear relationship between κ_{sc} (2K, 4.25K) and RRR



K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

Impurity



ニオブ中の不純物とRRRの関係

Umezawa's calculation.







K.Saito

多結晶・巨大結晶ニオブのRRRを測定してみよう

普通の多結晶ニオブ(組織拡大写真)





演習問題1(実験で必要)

測定電圧計としてレコダーを使う。その最大感度が5µV/cmである。 ニオブの比抵抗が17.0E-6Ωcm(20°C)である。RRRが300のサンプ ルを計るためにはサンプルの大きさをどう決めればよいか考えよ。 手に入るニオブの厚みを2.5mmとせよ。また、測定で流す電流の 大きさを1Aとせよ。

演習問題2(これはRRRの測定の後の議論で考えて下さい。)

RRRの測定でどうしてニオブ材の純度が評価できるのか?

ヒント: 電気抵抗を決めるメカニズムにどんな事があるか考えよ。

演習問題3(レポート作成のための議論で考えて下さい。)

RRRと熱伝導率の関係を考察せよ。 ヒント: Wiedemann-Franz law



Vortex State



Vortex state

ξ : Coherence lengt (size of Cooper pa



Figure 19 Triangular lattice of fluxoids through top surface of a superconducting cylinder. The points of exit of the flux lines are decorated with fine ferromagnetic particles. The electron microscope image is at a magnification of 8300, by U. Essmann and H. Träuble.

 λ_L : London penetration depth

Depth of penetration of the magnetic field

K.Saito





図 3.4 T(温度) < T_c(臨界温度)において,完全導体 PCと超伝導体 SC からなる素材の外部磁界に対する相違

K.Saito

RF Field limitation of vortex line nucleation



現象を予想する

演習問題4

T < Tc で、超伝導体に外部磁場 Hext(t) = αt を印加する。超伝導体に巻いたコイルの両端 をレコダーに入力し、電圧を記録するとどのようなシグナル波形が現れるか? 上記の超伝導体の説明を下にType-I、Type-IIの両方の場合について定性的に答えよ。





演習問題1で予想した現象から実際に超伝導体内の反磁場M(t)を 超伝導体に巻いたコイルの出力電圧V(t)から求めたい。 M(t)をV(t)を使って導出せよ。

$$M(t) = H(t) - Hext(t), \quad Hext(t) = \alpha \cdot t$$

$$V(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -n \cdot S_0 \mu \cdot \frac{dH(t)}{dt}$$

$$H(t) = -\frac{1}{n \cdot S_0 \mu} \cdot \int_0^t V(t) dt$$

$$\therefore \quad M(t) = -\frac{1}{n \cdot S_0 \mu} \cdot \int_0^t V(t) dt - \alpha \cdot t$$

K.Saito

演習問題 6

演習問題2の結果を使って、M(t)を導出し、Hext – M特性曲線を求めたい。起電圧 を測定するために使用する電圧計の感度がμVレンジである。常伝導状態になった 時の出力(Vo)を15μV程度と期待する時、ピックアップの巻数を計算せよ。 巻数をnとすると起電圧は下の式で与えられる。 Soはサンプルの断面積でその大きさを3mmx5mm、昇磁速度を65G/secとせよ。

$$V_{O} = -\frac{d\Phi}{dt}\Big|_{t > \infty} = -n \cdot S_{O} \frac{dB}{dt}$$





測定装置



配線の対応表1

Cable No	Cable Name	Comment	To where		
1	Pickup coil 空芯+		XY R. +		
2	Pickup coil 空芯 -	2-3 short		1 -	
3	Pickup coil Nb +	2-3 short			
4	Pickup coil Nb -		XY R		
5	Top T current lead +		C.source +	Top heater 2	
6	Top T current lead -	6-9 short			
$\overline{\mathcal{O}}$	Top T voltage +		Voltage M+		
8	Top T voltage -		Voltage M-	5	
9	Bottom T current lead +	6-9 short		$\begin{array}{c} 0 \\ \hline \\$	
10	Bottom T current lead -		C.source -		
1	Bottom T voltage +		Voltage M+		
(12)	Bottom T voltage -		Voltage M-		
13	RRR current lead +		C.source +		
14	RRR current lead -		C.source -	Bottom T	
(15)	RRR voltage +		Recorder +		
(16)	RRR voltage -		Recorder -		
1	Top heater current lead +		C.source +	\leq Bottom heater	
(18)	Top heater current lead -		C.source -		
(19)	Bottom heater current lead +		C.source +		20
20	Bottom heater current lead -		C.source -		28

	配線対応表	2	(2-
Cable no.	Cable name	To where]
(21)	RRR current lead +	Current source +	
22	RRR current lead -	Current source -	
23	RRR-1 Voltage +	3P-Recorder 1 +	
24	RRR-1 Voltage -	3P-Recorder 1 -	22
25	RRR-2 Voltage +	3P-Recorder 2 +	28
(26)	RRR-2 Voltage -	3P-Recorder 2 -	27)
27)	RRR-3 Voltage +	3P-Recorder 3 +	
28	RRR-3 Voltage -	3P-Recorder 3 -	
(29)	Heater current lead +	Current source +	
(30)	Heater current lead -	Current source -	



超伝導磁石励磁装置



TYPICAL SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM INTERCONNECTIONS

Magnet Specification

Rated Central Filed @ 4.2K	50KG	
Rated Curremt	76.5 Amperes	
Maximum Test Field @ 4.2K	60KG	
Field to Current Ratio	653.7 G/A	
Homogeneity over 1 cm DSV	± 0.1%	
Inductance	5.5 Henries	
Charging Voltage (Used in test)	1 Volt	
Clear Bore	88.9 mm	
Overall Length (Outside flange)	209.55 mm	
Maximum Outside Diameter	133.35 mm	
Weight	7.248 kg	
Persistent Switch Heater Current	48 mA	
Persistent Switch Heater resistance	57.5 Ω	
Total Magnet \$ Switch Resistance	22.2 Ω	



K.Saito

Measurement results with H_{C1}, H_C, H_{C2}



$$\mathbf{H}_{\mathbf{c}}(\mathbf{T}) = \mathbf{H}_{\mathbf{c}}(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{\mathbf{T}}{\mathbf{T}_{\mathbf{c}}}\right)^{2}\right], \quad \mathbf{F}_{\mathbf{n}} - \mathbf{F}_{\mathbf{s}} = -\int_{0}^{H_{c2}} M dH = \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}_{\mathbf{c}}^{2}$$

Abrikosov Theory: Type-II SCの理論

$$H_{c} = \frac{\kappa}{\lambda^{2}} \frac{\hbar c}{\sqrt{2}e^{\ast}} = \frac{\kappa}{\lambda^{2}} \frac{(hc/2e)}{2\pi\sqrt{2}} = \frac{\phi_{0}}{2\pi\sqrt{2}\lambda\xi}$$

$$H_{c2} = \sqrt{2} \frac{\lambda}{\xi} \frac{\phi_0}{2\pi\sqrt{2}\lambda\xi} = \frac{\phi_0}{2\pi\xi^2}$$

$$\boldsymbol{H_{c1}} = \frac{\boldsymbol{\phi}_{o}}{4\pi\lambda^{2}}\ln(\frac{\lambda}{\xi} + 0.08)$$

$$\phi_0 = hc / 2e = 2.0678 \times 10^{-7} Gauss \cdot cm^2$$

= 2.0678 × 10⁻¹⁵ T · m²

K.Saito

T-dependence of λ , ξ , κ

Abrikosov theory

$$\xi = \sqrt{\frac{\phi_0}{2\pi \cdot H_{c2}}}, \ \lambda = \sqrt{\frac{\phi_0 \cdot H_{c2}}{4\pi \cdot H_c^2}}$$

一方、理論/実験の両面から $\lambda(T)$ 、Hc(T)は、 $\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}$, H_c(T) = H_c(0) - $\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right]$

$$\mathbf{H}_{c2}(\mathbf{T}) = \frac{4\pi\lambda(\mathbf{T})^{2}}{\phi_{o}} \cdot \mathbf{H}_{c}(\mathbf{T})^{2} = \frac{4\pi\lambda(\mathbf{0})^{2} \cdot \mathbf{H}_{c}(\mathbf{0})^{2}}{\phi_{o}} \cdot \frac{\left[1 - (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}\right]^{2}}{1 - (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{4}}$$
$$= \mathbf{H}_{c2}(\mathbf{0}) \cdot \frac{1 - (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}{1 + (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}$$
$$\xi(\mathbf{T}) = \sqrt{\frac{\phi_{o}}{2\pi \cdot \mathbf{H}_{c2}(\mathbf{0})}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}{1 - (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}} = \xi(\mathbf{0}) \cdot \sqrt{\frac{1 + (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}{1 - (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}}$$
$$\frac{\lambda(\mathbf{T})}{\xi(\mathbf{T})} = \kappa(\mathbf{T}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\mathbf{H}_{c2}(\mathbf{T})}{\mathbf{H}_{c}(\mathbf{T})} = \frac{\mathbf{H}_{c2}(\mathbf{0})}{\sqrt{2} \cdot \mathbf{H}_{c}(\mathbf{0})} \cdot \frac{1}{1 + (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}} = \frac{\kappa(\mathbf{0})}{1 + (\mathbf{T} / \mathbf{T}_{c})^{2}}$$

K.Saito

Principle of 50MV/m

Cavity shape designs with low Hp/Eacc

TTF: T Reentra Low Los Ichiro-	ESLA shape Int (RE): Cornell Univ. Iss (LL) : JLAB/DESY -Single (IS) : KEK	TTF 1992	LL 2002/2	2004 F	RE 102
		TESLA	LL	RE	IS
	Diameter [mm]	70	60	66	61
	Ep/Eacc	2.0	2.36	2.21	2.02
	Hp/Eacc [Oe/MV/m]	42.6	36.1	37.6	35.6
	R /Q [W]	113.8	133.7	126.8	138
	G [W]	271	284	277	285
	Eacc max	41.1	48.5	46.5	49.2

from J.Sekutowicz lecture Not


なぜニオブ超伝導物性の測定を KEKでやるのか?

次世代の高エネルギー物理とILC計画

AP.1 高エネルギー物理と加速器

AP.2 粒子加速原理

AP.3 ILC加速器計画

AP.4 ニオブ材の製作法

AP.5 超伝導空洞の設計・製作法

K.Saito AP.6 ILCに向けた日本の高電界空洞戦略

AP.1 高エネルギー物理と加速器



要するに、ミクロの世界をのぞくには





1990-2005年代の輝かしい高エネルギー物理実験成果

- トップクォークの発見。1994年@FNAL(Tevatron)
- 素粒子は3世代である。1995年@CERN(LEP-I)
- ・ Higgs粒子の質量は、114 GeV < m_H < 186 GeV。2005年@Tevatron + LEP-II
- CP対称性非保存の発見。標準モデルの確認。
- ニュートリノの質量発見。2004年@カミオカンデー、K2K。標準モデルのほころび



古典物理から現代素粒子物理への系譜





AP.2 加速器による粒子加速の 原理



電子、陽子の加速エネルギーと速度





Ring 加速の原理



Ring加速器 同じ加速管で何度も荷電粒子を加速。非常に高率が良い。





電子がRing一周当り放出する放射項光りエネルギー =加速で貰うエネルギー

で加速が止まる。



線形加速器(LINAC)のRF加速原理(超伝導空洞の場合)











LEP @ CERN







100GeV ➡200GeV CM Energy *超伝導加速空洞*





LEP-II







LHC @ CERN

2007年秋に運転開始予定



ATLAS Detector







KEKB @ つくば







AP.3 ILC加速器計画

K.Saito

国際リニアーコライダー1(ILC)計画



2004年夏、次世代の高エネルギー物理実験にむけたe+/e-衝突型リニアーコラダーの技術に 超伝導技術を選択、世界三極のどこかに2018年頃までに建設ことするを決定。



1st Stage: 500 GeV



Schematic Layout of the 500 GeV Machine



BCD Cavity shape : TESLA



ACD cavity shape : LL



K.Saito



TTF Cryostat Cross-section





Figure 3.3.2: Cross section of cryomodule.

K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

61

Cryomodule in the ILC Tunnel



ILC500 Gradient dependence with tunnel length and cost



Total cost = Tunnel(1/Eacc) + Cryomodul(1/Eacc) + RF(Eacc) + Cryoplant(Eacc²) + Cryo-Operation(Eacc²) + Beampower(const) $= [C_{T} + C_{CM}] \cdot \frac{1}{Eacc} + C_{RF} \cdot Eacc + [C_{Cryplant} + C_{Cryoop}] \cdot Eacc² + C_{Beampower}$

 K.Saito
 超伝導空洞用ニオブの材料評価
 63



まとめ

- 1)ILCはHiggs粒子探索を第一目標にした重心衝突エネルギー 500GeVの電子・陽電子線形コライダーである。
- 2)現在、世界三極が協力して、国際的に加速器の設計が 進んでいる。

AP.4 ニオブ材の製作法

Where and What is CBMM



Araxa in Brazil



Distribution of Nb mines

40hr travel from Tokyo!



K.Saito

66

ニオブ鉱山







各種金属の蒸気圧



図10 ニオブのEB溶解製錬からみた混入金属元素の蒸 気圧

Electron Beam Melting



High purity Nb



K.Saito
Impurity



Effect of Ingot diameter



Material evaluations



Gas analysis (Hydrogen, Oxygen, Nitrogen) : HORIBA

Carbon analysis



Other gas analysis systems

蛍光X線分析装置



EBM furnace and Nb Ingots



K.Saito

RRR measurement in Tokyo Denkai



東京電解(株)

K.Saito

Rolling



ゴミを噛み込ませない努力

K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

80

ニオブ板







Fermi Lab SMTF用 超伝導空洞用ニオブ材

東京電解(株)

ニオブの材料評価

Nb金属組織



良くなまされた場合



K.Saito

Vacuum annealing system



東京電解(株) 1400°C Max, ~1x10⁻⁶ Torr Effective working zone 1000\overline x 1800L Ta heater



Hardness and Mechanical properties



Tensile Test Machine







<u>是国来工作加工</u>大ブの材料評価

Mechanical Property (Well annealed case)



Mechanical Property (Non annealed case)



K.S





12.00000

Large grain niobium cavity R&D in Jlab



BCP could produce 35MV/m gradient and it brings further cost down.

K.Saito

Single Crystal / Large Grain Nb Production



AP.5 超伝導空洞の設計・製作法

K.Saito

ICHIRO Cavity(1300MHz 9-cell structure)





K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

92

Real cavity design

Meshing Driving poin	
All calculated values below refer to the mesh geometry only. Field normalization (NORM = 0): EZERO = 1.00000 MV/m Length used for E0 normalization = 10.76000 cm Frequency (starting value = 1300.000) = 1293.77430 MHz Particle rest mass energy = 0.510999 MeV Beta = 1.0000000 Normalization factor for E0 = 1.000 MV/m = 7048.913 Transit-time factor Abs(T+iS) = 0.5454664 Stored energy = 0.0038869 Joules Using standard room-temperature copper. Surface resistance = 9.38405 milliOhm Normal-conductor resistivity = 1.72410 microOhm-cm Operating temperature = 20.0000 C Power dissipation = 1118.1551 W Q = 28257.6 Shunt impedance = 96.230 MOhm/m Rs*Q = 265.171 Ohm Z*T*T = 28.632 MOhm/m r/Q = 109.024 Ohm Wake loss parameter = 0.22157 V/pC Average magnetic field on the outer wall = 1729.9 A/m, 1.40411 W/cm ² 2 Maximum H (at Z,R = 3.32643,8.55466) = 1753.44 A/m, 1.44258 W/cm ² 2 Maximum E (at Z,R = 4.75232,4.24425) = 0.946176 MV/m, 0.02953 Kilp. Ratio of peak fields Bmax/Emax = 2.3288 mT/(MV/m) Power dise	Hp Ep Ep U

K.Saito

空洞のRF特性の直感的把握



空洞設計では、beam pipeの径が大きな影響を与える。その径が小さくなるとHp/Eacc, Ep/Eacc,が小さくなる。また、beam 軸にE-fieldが集中するのでシャントイピーダンスが上がる。 ただし、多連空洞ではcell-to-cell couplingが小さくなり、fieldの安定度が得られにくい。 また、HOMも問題になる。これらの全体的考察から最適化される。

Fabrication Flow:現状



KEK in-house experience with 9-cell cavity (Ichiro 9-ce

Fabrication of half cell

Pressing Nb plate

56 half-cells were pressed in a few hours







After trimming





After pressing

Deep Drawing

80 t プレスfor 2.5t Nb half cell (1300MHz)



Fabrication of Dumbbell with stiffener



Dumbbell with stiffener-ring after EBW.

Pull and extend dumbbells to insert stiffener-ring. => EBW (dumbbell + ring)

Insert stiffener-ring into the iris part of dumbbell.

EBW Assembly of Cavity



Four 9-cell ICHIRO high-gradient LL Cavities were successfully delivered to KEK ! (4 July 2005)

EBW of end-beam-pipes and cell-part

AP.6 ILCに向けた日本の 高電界空洞戦略

K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

100

Limitation of 1750 Oe



Pulse 法による RF 臨界磁場の測定



K.Saito

超伝導空洞用ニオブの材料評価

102

RF Field limitation of vortex line nucleation



他の材料(Nb_3S_n , Pb)の空洞に対する有効性のチェック



104

Principle of 50MV/m

Cavity shape designs with low Hp/Eacc

TTF: T Reentra Low Los Ichiro-	ESLA shape Int (RE): Cornell Univ. Iss (LL) : JLAB/DESY -Single (IS) : KEK	TTF 1992	LI 2002/2	2004 F	RE 102
		TESLA	LL	RE	IS
	Diameter [mm]	70	60	66	61
	Ep/Eacc	2.0	2.36	2.21	2.02
	Hp/Eacc [Oe/MV/m]	42.6	36.1	37.6	35.6
	R /Q [W]	113.8	133.7	126.8	138
G[W]		271	284	277	285
	Eacc max	41.1	48.5	46.5	49.2

from J.Sekutowicz lecture Not

ICHIRO Cavity program in KEK for ILC



)6

Eacc vs.

Year 2nd Breakthrough! 70 1st Breakthrough! RE, LL, IS shape New Shape 60 **High pressuer** water rinsing (HPR) **50** Eacc,max [MV/m] (\cdot) **40 Electropolshing(EP)** 30 + HPR + 120^oC Bake 20 **Chemical Polishing** 10, j 10'91 '93 '95 '97 '03 '05 '99 **'07** '00 Date [Year]

+EP(20µm)+EP(3µm, fresh, closed) +(HF*or No HF)+HPR+Baking



HF rinsing is no effective.

Light EP +EP(3) is effective for both high gradient and narrow scatter.

Ave. Eacc=46.7±1.9MV/m

Scattering:4%, Acceptability@40MV/m(ACD):100%

		IS#2	IS#3	IS#4	IS#6	IS#7	CLG#1
+EP(20+3) +HF*	Eacc	47.07	44.67 *	47.82	48.60 *	43.93*	47.90*
	Qo	1.06e10	0.98e10	0.78e10	0.80e10	1.17e10	1.0e10
ILC500 Gradient dependence with tunnel length and cost



Total cost = Tunnel(1/Eacc) + Cryomodul(1/Eacc) + RF(Eacc) + Cryoplant(Eacc²) + Cryo-Operation(Eacc²) + Beampower(const) $= [C_{T} + C_{CM}] \cdot \frac{1}{Eacc} + C_{RF} \cdot Eacc + [C_{Cryplant} + C_{Cryoop}] \cdot Eacc² + C_{Beampower}$

 K.Saito
 超伝導空洞用ニオブの材料評価
 109