

超伝導強磁場応用技術と構造材料

—素粒子加速器用材料を中心として—

野原清彦

川鉄テクノリサーチ(株) 専門技監

Kiyohiko Nohara

Structural Materials for Superconductivity Application at High Magnetic Field
—Focussing on those for Particle Accelerator—

1 はじめに

今世紀始めにオランダのカメリン・オンネスによって超伝導現象が発見されて以来、長らく理学的興味の対象の時代が続いた。しかるに高エネルギー(素粒子)物理学実験用加速器の巨大化がいわば先導役となり、高温超伝導体発見のブームも手伝って、超伝導応用が工学的対象として現実のものとなってきた¹⁾。MRI(磁気共鳴医療診断装置)がすでにコマーシャルベースで製造・販売・実用化されているのは周知の事実である。

さて、超伝導現象の理工学的実用対象は、強磁場応用諸分野とエレクトロニクス分野に大別することができるが、前者には上記大型粒子加速器に代表される高エネルギー物理学分野やMRIが成果を発揮している医療分野のほかに、運輸・交通分野(磁気浮上列車他)、電力・エネルギー分野(核融合、電力貯蔵等)、産業機器・機械プロセス分野(磁気分離、磁気ベアリング等)、物理研究分野(電子顕微鏡等)と多岐にわたる。これら諸分野に関わる超伝導応用技術の開発研究を遂進するためには種々の基盤技術の支援・連携と新技術開発がぜひとも必要となる。すなわち、応用物理学、生産・機械工学、電気・電子工学、低温工学、計測・制御工学、土木・建築学、原子力工学、それに材料工学等々である。

本稿では加速器を中心として磁気浮上列車、核融合、電力貯蔵等に使用すべき構造材料についてしるすこととする²⁾。ここでとりあげる各技術の構造材料が関連する共通のキーの一つは新しい超伝導磁石(コイル)の開発である。

2 高エネルギー物理学用超伝導加速器について

2.1 概要

近年、高エネルギー(素粒子)物理学における成果にはめざましいものがある。いわゆる標準理論(電磁気力と放射壊変に関連する弱い力を統一的に説明しようとする理論)において存在を予測されていたトップフォークが遂に100%近い確率で発見されたことが報じられている。これは、超伝導衝突型加速器を用いて、米国のフェルミ国立加速器研究所でなされたものである³⁾。

この種のシンクロトロン形式の加速器はますます大型化しつつあり、財政事情もあってR/D途中でキャンセルとなった米国のSSC(Superconductivity Supercollider)計画にかわって、現在欧州を中心に国際協力のもとに進められているのがLHC(Large Hadron Collider)計画である。これは図1に示すように、欧州合同加速器・原子核研究所の

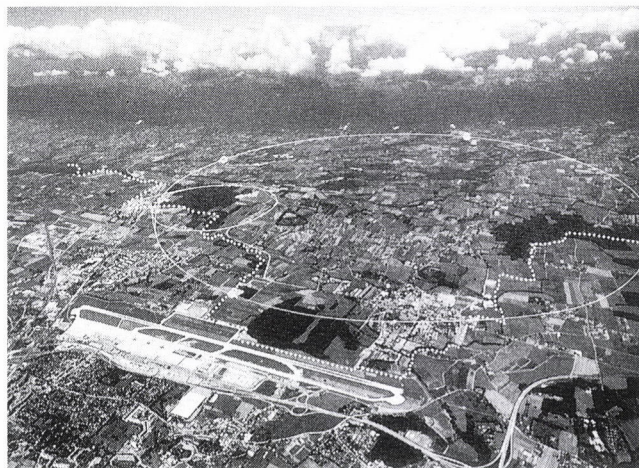


図1 CERN(欧州合同加速器・原子核研究所)の鳥瞰図(大きな円：主リング、点線：スイス／仏国境、手前：ジュネーブ国際空港)

全周約27km(上記フェルミのものは全周約6 km)のトンネル(地下約100m)内に2005年完成をめざして建設しようとするもので、おもに質量の起源に関わるヒッグス粒子の探索を目的とする⁴⁾。

直近では、周長500kmに及ぶ同種の巨大加速器VLHC (Very Large Hadron Collider)計画の検討が米国で始まっているほかに、シンクロトン形式では必然的に発生する放射光の影響を回避できる線型超伝導衝突型加速器のR/Dが欧・日・米で開始された。これも延長20kmを越える大型のものになる予定である⁵⁾。

2.2 加速器の構成と構造材料

シンクロトン型超伝導衝突型加速器の主要構成装置は次のようである：(a)超伝導磁石(SCM)、(b)粒子検出装置、(c)超伝導高周波空洞(SCC)、(d)冷凍・冷却関連設備等である。これらは、いずれも構造材料を相当量使用する。なかんずく、SCMの開発・製作は加速器の成否を決定する肝要な装置であり、材料側からいっても技術的課題や大量使用の点から重要である。図2にLHC用R/DによるSCMの一例を示す⁶⁾。これは10m長長のビーム偏向用双極磁石の試作品であるが、本格量産品は両端アタッチメントを入れて約15m長になるものと予想され、1,200台余り製造される(LHC用SCMにはこの他にもビーム収束用主4極磁石や衝突点特殊磁石、補正補石など種々あって、合計2,000台に及ぶSCMが必要となる)⁷⁾。

超伝導双極磁石の断面はハイブリッド構造を有しており、特に超伝導状態を維持するため極低温(4.2K以下)に冷却されるコールドマスと呼ばれる部分(図3に模式図を示す)が磁石性能を左右する。超伝導コイルをはさんで、極低温構造材料として加速衝突ビーム(陽子、反陽子、電子、陽電子等)用チューブ(非磁性)、電磁力支持用カラー及びカラー

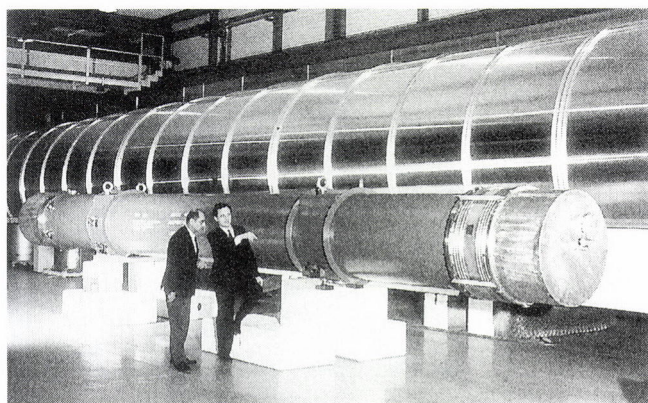


図2 LHC(大ハドロン衝突型加速器)計画用10m長プロトタイプ超伝導磁石の外観

シュー(非磁性)、磁気シールド用(センター)ヨーク(強磁性)、磁界擾乱抑制用エンドヨーク(非磁性)、格納用アウターシェル(弱磁性)等が使用される。構造体にはプリストレスが付与され、室温と極低温間で熱履歴がくり返される。

2.3 ニュートリノ及び放射光用加速器

現在、究極の粒子、すなわち素粒子として6種類のクォーク(この組み合わせによって陽子、中性子等のハドロン(重粒子)が形成される)と6種類のレプトン(軽粒子)の計12種類の粒子の存在が知られている。レプトンには電子(電荷を持つ)、ミュー粒子、タウ粒子の3種類の粒子と、クォークを含めて唯一電荷をもたない素粒子として3種類のニュートリノがある。このニュートリノの質量が極端に小さいと思われる(電子の10億分の1くらいか?)等の謎を解くための加速器⁸⁾にも大量の構造材料が使われる。

電子が走行方向を変えるときに発生する放射光利用設備は、比較的低エネルギーの加速器の一種ということができ、高エネルギー物理の波及効果といえる。半導体、医学・生物学、材料科学等に広く応用できると同時に、この設備をつくるのに超伝導技術と多量の構造材料が使用される⁹⁾。

以上、加速器関連諸設備と構造材料について述べたので、表1にそれら設備・コンポーネントと構造材料につき、全体像をまとめておく。これをみると、やはり鉄鋼材料が中心になるものと考えられ、その最先端技術への寄与が期待されるところである。

3 加速器用超伝導磁石と構造材料

3.1 超伝導磁石用非磁性構造材料

図3に示した超伝導磁石コールドマスのカラー、ビームチューブ、カラーシュー、エンドヨーク(ボイド)やディテ

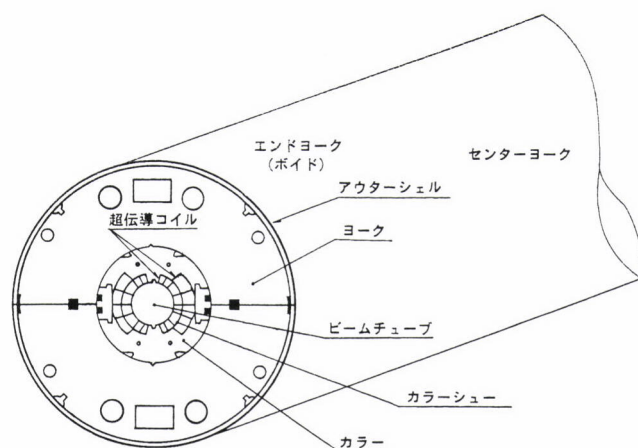


図3 超伝導磁石のコールドマス(極低温冷却部)の断面図

表1 種々の加速器と構造材料

加 速 器									
高エネルギー加速器			ニュートリノ設備			放射光設備			
シンクロトロン衝突型 リニアック衝突型									
超伝導磁石	ビームパイプ (非磁性、製造)	ステンレス鋼 (高Mn鋼)	打出し側 (KEK)	超伝導磁石	Al ステン レス鋼	常伝導磁石 (ストレージリング)	鉄	ケイ素鋼	その他
	カラー (カラーシュール)	Al合金 高Mn鋼 改良ステンレス鋼		陽子シンク ロトロン	Al合金		ワットロス ヒステリシス	その他	
	強度、非磁性、ヤング率、 熱膨張、打抜き性、 溶接性、平坦度			収束用電磁石 ホーン	鉄		リニアック 前段加速器	Al ステン レス鋼	
	エンドヨーク (ボイド)	高Mn鋼 改良ステンレス鋼		ビームダンプ (未反応陽子 未反応電子 中間子の吸 収用)	鉄				
ヨーク	センターヨーク	純鉄	受入れ側 (神岡地下検出器)	貯水槽	ステン レス鋼	超伝導磁石 (ストレージリング)	ウィーグラー アンジュレータ	ステン レス鋼 (Al合金)	その他
	強度、シールド性、 保磁力、透磁率、熱膨 張、打抜き性、平坦度、 プレスフィット、スタ ッキング性			耐食 強度 耐放射	その他 土木建 築用構 造材		低温特性 超伝導使用		
高周波空洞	本体	純Nb	受入れ側 (神岡地下検出器)	鉛ガラス 同支持材	鉛ガラス 非磁性材	放射光 取出し装置 実験機器			アルミ ステン レス鋼 他
ディテクター	リターンヨーク、エンドキャップ	純鉄							
	強度、シールド性、保磁力、 透磁率、厚板製造、種属								
冷凍冷却	鉛ガラスサポーター (非磁性、強度)	高Mn鋼 ステンレス鋼							
	デュワー トランファーチューブ パイプ (低温特性)	ステンレス鋼 (樹脂系)							

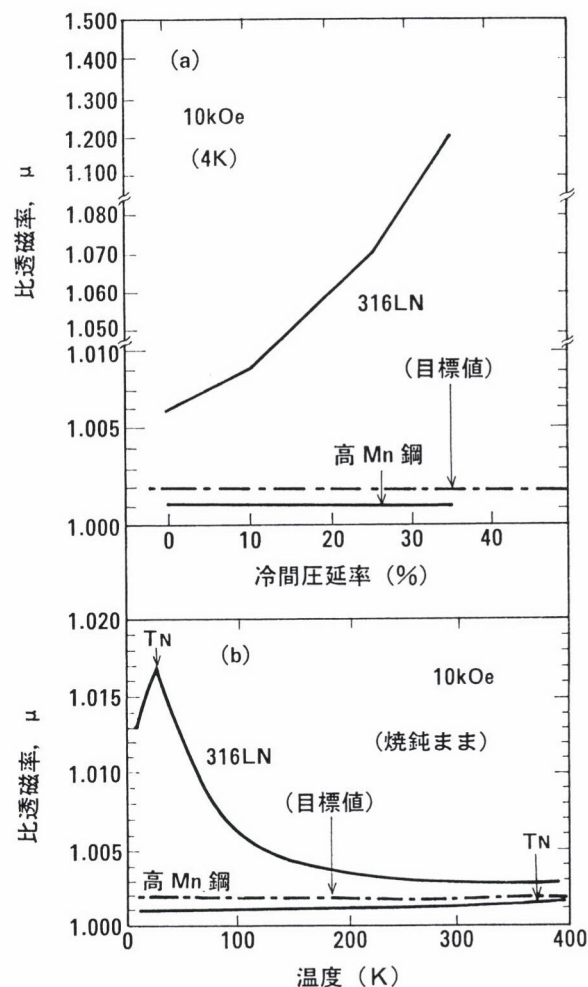


図4 高Mn鋼とステンレス鋼の極低温比透磁率の加工及び温度による変化

クターの鉛ガラスサポーター用として非磁性構造材料が必要となる。特にカラー材料は発生強磁界との相互作用を抑制するため非磁性であること、電磁力を支持するため高強度であること、ヨーク(純鉄)との接触を維持するため低熱膨張性を有すること等が求められる。候補材料として表1のようにステンレス鋼やAl合金があるが、一長一短がある。ここでは新たに開発された極低温用高Mn非磁性鋼について触れる¹⁰⁾。

この鋼はCを0.1%、Mnを28%と大量に含み、その他の成分添加に工夫を施した完全オーステナイト鋼であり、図4に示すように変形や極低温までの温度変化による比透磁率(10kOe)の変化がほとんどなく、1.002以下をキープし、極低温領域でこれまで使われてきた316LNステンレス鋼と対照的である。これは本鋼のネール点(T_N)が室温以上の高温域に存在することによる。そして T_N が次式で成分組成と結ばれることが見いだされたので、組成制御により T_N 、ひいては比透磁率が所要の値を満たすように成分の組成をコントロールしたものである¹¹⁾。

$$T_N(K) = 270 / (3.8C\% - 0.22Mn\% + 6.9) \quad \cdots (1)$$

また、高強度(0.2%耐力: 690MPa(室温)、1500MPa(4K)、引張強さ: 830MPa(室温)、1720MPa(4K))であ

り、熱膨張係数もヨーク用純鉄よりも低い($7.5 \times 10^{-6}/\text{deg.}$ (4~300K))ので、超伝導磁石の励起実験によって得られた図5に示す6極誤差成分の電流依存性から推察されるように、本鋼製カラーを用いるとステンレス鋼製カラーの場合と異なってカラー/ヨーク間のギャップ生成/衝突接触が回避される¹²⁾。

3.2 超伝導磁石用強磁性構造材料

図3及び表1によれば、超伝導磁石の(センター)ヨークやディテクターのヨーク材として強磁性の純鉄材料が必要となる。超伝導磁石の(センター)ヨークは、ビームチューブ内に励起される強磁界(LHCの場合、中心磁界で8万ガウス以上)が磁石外部に漏洩せぬよう磁気シールド作用を受けつつ重要なコンポーネントである。シールド性を高めるために電磁保持力 H_c の低減が求められた。 H_c の計算値 $H_{c(cal)}$ が次式、

$$H_{c(cal)}(Oe) = \alpha + \sum \beta_i C_i(\%) + \gamma d(\mu m) \quad \cdots (2)$$

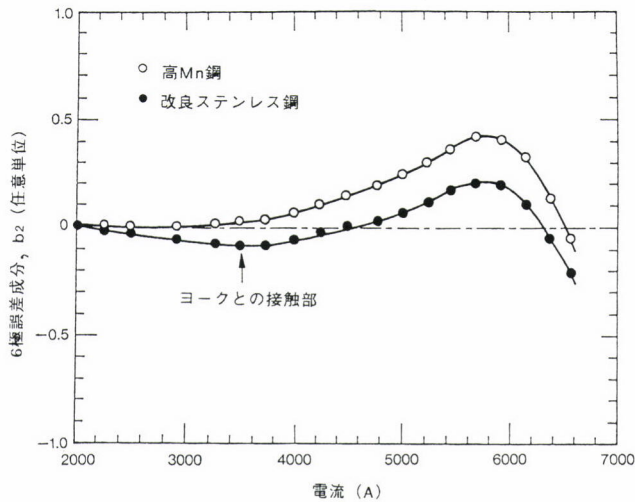


図5 超伝導磁石ビームチューブ内6極誤差成分の励起電流による変化

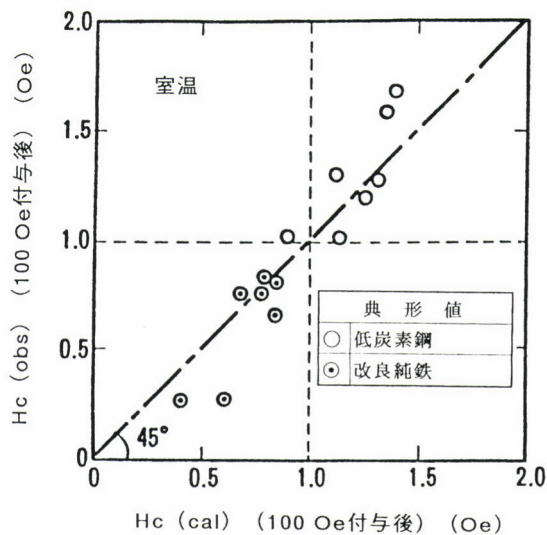


図6 保磁力(Hd)の計算値と実測値の関係

によって成分組成および光学顕微鏡で観察することのできる結晶の大きさから計算することが見いだされ¹³⁾、図6のように実測値 H_c (obs)とよく対応することを知見した結果、商用純鉄(低炭素鋼)では達成困難であった $H_c < 1.1$ を安定達成できる改良純鉄が開発された¹⁴⁾。(上式において定数 α (冷延) = +0.05, α (熱延) = -0.55, C_i は組成、 β_i はその係数(C: 200, N: 200, S_1 : 0.5, Mn: 1, P: 20, S: 20, Al: 46, O_2 : 20 (冷延) または 80 (熱延)), d は粒径、 γ はその係数で -2×10^3 。この他に(100)方位や残留応力も H_c に影響する)。改良純鉄の特徴はCを10ppm程度、Nを15ppm程度と従来量より半減せしめるとともに、他の不純物元素をも低減して、一層の高純度化を工業的に達成したことである。

さて(センター)ヨークは、精密打抜き後積層されるので、

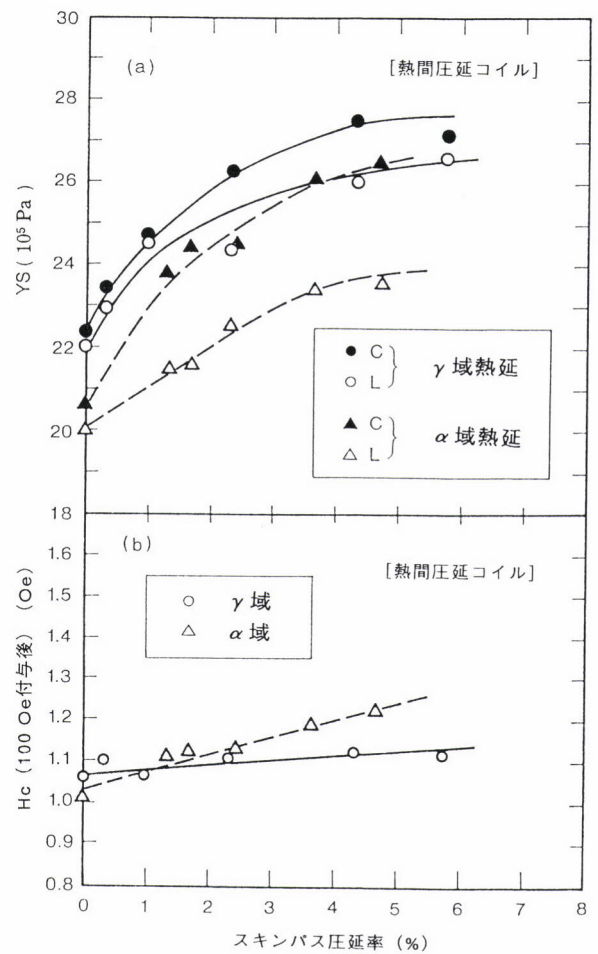


図7 純鉄材の降伏応力(YS)と保磁力(Hc)の γ 及び α 域熱処理におけるスキンプス圧下率による変化

上記のように成分の高純度化、なかんずく極低炭素化した改良純鉄の打抜き性は、強度低下/粘さのため劣化する。これを回避するべく、熱延/自己焼鈍後スキンプス(軽圧下圧延)処理を施すことにより、図7に示すようにHcの低下を極小に抑えて、数10MPaに及ぶ強度の上昇を実現した。特に γ 領域の熱延の場合に望ましい効果が現われることがわかった。このような新発見は特にC, Nの極低値化によるものと推察される。

3.3 超伝導磁石非磁性材料の加工性

新たに開発された極低温用高Mn非磁性鋼を超伝導磁石のカラーやボイドに適用する場合、種々の加工性が要求されるが、とりわけ精密打抜き性と冷間嵌合性が重要である。その理由は、交流損失を抑制するため、15m長に及ぶ実機のすべてを薄板の積層タイプにするからである。

図8はこの極低温用高Mn非磁性鋼のカラーを2.5mm厚冷延コイル素材から精密打抜きしたときの打抜きまま及びバレル研磨と最終レベラー矯正後の平坦度のレベラー/アンコイラー条件による変化を示したものである¹⁵⁾。高強度

表2 超伝導磁気浮上列車と構造材料

区 分	対 象	候補構造材料	技 術 課 題	
			一 般	材 料
1	軌道(ガイドウェイ)	難磁性鉄筋	- 磁石収納方式 - 環境問題 - 防風 - 磁気シールド	- 加工性、溶接性 - 透磁率 - 耐久性 - ガス切断、穴あけ他
	側 壁	アンカーボルト(コイル取付) — ボルト — インサート(押込ネジ) — スペース		
2	車 両	磁気シールド 強度メンバー 型枠台車	- 超伝導磁石の開発 - 磁気シールド法	- 軽量磁気シールド材 - 純鉄の磁性 - 三次元磁場解析
3	駅	磁気シールド乗降装置 シールド非磁性駅舎	- 風防装置 - 磁気シールド方法 - 乗降客輸送システム	材料選択と装置製作
4	分 岐	分岐装置	- 油圧方式と電気方式の検討 - 可動区間と固定区間の接点 - 精度の問題	- 加工性 - 溶接性
5	橋	橋梁設計施工	- トラスゲタ方式(鉄)の検討 - PCゲタ方式の検討	材料の選定
6	トンネル	掘削・施工	U型鋼	半円径における列車出入口の空気抵抗対策
7	電力供給	変電所 送電	- パイプ(材) - FRP - 非磁性材 - 強磁性材	強電用(ケーブル)と弱電用(ファイバークーブル)のパイプ材の開発
8	磁 石	車載用(超伝導)	Al合金、ステンレス鋼	- 材料の選定 - 強度、極低温特性 - 加工性、溶接性
		側壁用(常伝導)→推進用、浮上用	ステンレス鋼、高Mn鋼	- 機能の確立 - 磁気の影響

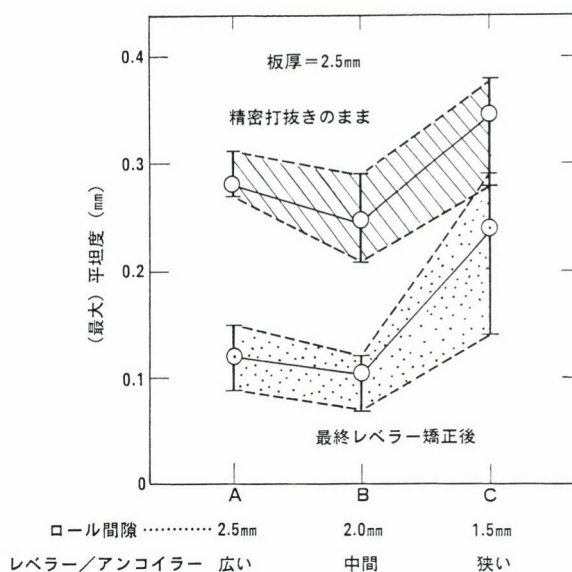


図8 高Mn鋼の精密打抜きにおける表面平坦度のレベラー条件と矯正処理(最終レベラー)による変化

材ではあるが平坦度は0.1mm程度を実現し得ており、実用にたえることが示された。同じく嵌合性に関する実験データを図9に示す¹⁶⁾。穴径とダボ径の差(嵌合径の差)(穴径のほうが小さい) - Intf. (= Interference) をパラメータとして、嵌合深さを変化させたときの引抜き力は図示のとおり、発生電磁力に耐えるための目標値(嵌合部2ヶ所のほうが1ヶ所の場合より小さい)をクリアする条件が存在することが示されている。

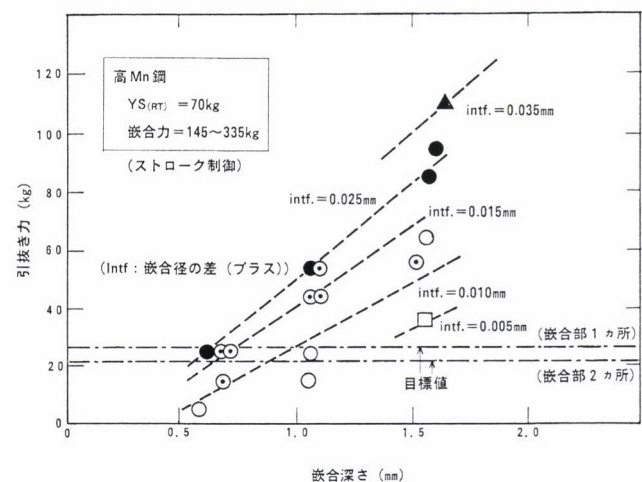


図9 高Mn鋼の冷間嵌合実験結果

加工性としては、この他にもスポット溶接性、スタッキング性、磁石への組立性等が要求され、それらすべてが材料性能とあいまって磁石性能としてのプリストレスロス、変形/ひずみ量、クエンチ特性、ランプレート特性、磁界の大きさと均質性等に影響することとなる。

4

磁気浮上列車・核融合・電力貯蔵と構造材料

4.1 磁気浮上列車

周知のように、わが国では年来超伝導型の磁気浮上列車

表3 核融合超伝導コイル用極低温構造材料と特性(4K)

JCS*	成分組成 (wt %)							機械的性質						
	C	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Others	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	CVN (J)	Jic (kJ/m ²)	Kic (MPa√m)
CSUS-JKA1	0.023	0.49	14.0	25.0	0.68	0.268	V: 0.30 Cu: 0.70	1295	1534	34	49	250	460	302
CSUS-JN1	0.026	4.2	14.74	24.2	—	0.34	—	1403	1782	40	52	183	196	201
CSUS-JN2	0.050	22.4	3.22	13.4	0.70	0.24	—	1215	1603	36	46	125	182	189
CSUS-JK2	0.05	21.79	4.94	12.82	—	0.212	—	1203	1623	39	52	124	188	202
CSUS-JJ1	0.046	9.74	11.92	12.21	4.89	0.203	—	1110	1574	43	51	185	372	267

* Japanese Cryogenic(Structural)Steels(for Superconducting Nuclear Fusion Coil)

の開発が進められている。1997年度からは山梨実験線における擦違いを含む走行実験が始まった。

表2にこのシステムの建設に要する候補構造材料を中心とした使用対象、技術課題をまとめた¹⁷⁾。車載用超伝導磁石が用いられるのが特徴であるが、そのために磁場の擾乱を避けること、磁気シールドを行って人体への影響をなくすこと等が必要となり、随所に非(難)磁性材料が使用されることとなる。すでに、山梨実験線に多量の高Mn非磁性鋼が使用された。軌道/側壁用に非磁性PCワイヤーの開発も進められている。

4.2 核融合

核融合発電は次世紀のクリーンエネルギーとして長期にわたる研究開発が国際協力のもとで進捗中である。最有力とみられるトカマク方式の当面の目標は、自己点火条件をめざした国際熱核融合炉であり、大規模な超伝導コイルが設けられる。

このための極低温構造材料の研究が、日本原子力研究所の主導のもとで行われ、表3に示すステンレス鋼系の候補新鋼種が開発されている¹⁸⁾。いずれも高圧保安協会の認定を得ており、表3の脚注のように“JCS”の記号を冠している。新材料の材質の特徴は、従来材では不可能であった4 KでのYS $\geq$ 1200MPa、K_{IC} $\geq$ 200MPa√mの設計目標値をクリアすることであり、なんとかこれを達成し得ている。

4.3 電力貯蔵

電力/エネルギーの効率的利用の観点から、大容量の電力貯蔵システムの構築は重要な社会的要請である。種々の貯蔵方法が考えられているなかで、超伝導の利用技術は、永久電流による高効率貯蔵が期待される点で可能性の高い選択肢の一つである。

表4に(岩磐支持型の)超伝導電力貯蔵システムの各種構

表4 SMES(超伝導電力貯蔵)と構造材料

SMES構造物		使用環境 (K)	候補材	製造方法	候補材料の		形状: 板			
			金 属 非金属	(製 品)	おもな特性	ステン レス鋼	高Mn鋼	Al合金	FRP	
導体 支持部	ブリック	4.2	Al合金 (A7075)	押出し	機 械 的 性 質	YS (MPa)	240~ 350	350~ 490	370~ 560	710 (TS)
			高Mn鋼他	型 鍛		伸び (%)	50~60	65~75	8~29	5
	絶縁 プレート他	4.2	FRP (G-10)	板 状 ボ ル ト		CVN (J)	300	200~ 300	18	37
断 熱 支持部	支持本体	4.2 ~ 300	FRP (G-AE-1) 他	成形 ホットプレス		疲労強度 [104回; MPa]	800~ 900	800~ 900	510	560
						ヤング率 [RT; MPa]	21 ~22 ×10 ⁴	21~22 ×10 ⁴	7.5~8.5 ×10 ⁴	3 ×10 ⁴
	縦支柱	4.2	ステンレス鋼 高Mn鋼他	板 組 鋼 鋼		熱伝導率 4K; W/m・k	3.6~ 6.0	15.0	21	0.09
真空 容器	ベース プレート	300	ステンレス鋼 高Mn鋼他	板		電気抵抗 4K; μΩ・cm	60~90	60~90	5.2	—
						熱膨張率 4K; 10 ⁻⁶ /℃	17	6.2~ 12.1	0.2	0.1
	真空本体	80 ~ 300	ステンレス鋼 高Mn鋼	板		透磁率 [4K]	1.008 ~1.005	1.001 ~1.002	1.000	1.000
支持部	比 重 [RT; g/cm ³]					7.7~ 8.0	7.7~ 8.0	2.7	2.0	
液体 リウム 容器	ヘリウム 本体	4.2	Al合金 ステンレス鋼 高Mn鋼	板 条 鋼	そ の 他	加 工 性	△	△	×	△
						溶 接 性	△	△	×	△ (接着)
						耐 食 性	○	△	△	○
耐アウトガス性	○	○	×	—						
製造/製作技術						可/可	可/可	可/可	可/可	

〔備考〕①FRPの強度: 引張強さで示す。②熱伝導率、熱膨張率は4 Kへの外挿値。

③RTおよび4 Kの条件がいないところは使用環境に準じた値とした。

④○優良 △可能 ×困難 (不可能に近い)。

造物及び候補構造材料・おもな特性のまとめを示す¹⁹⁾。超伝導コイルの導体支持部や断熱支持部を始めとして、極低温/強電磁気環境で使用される構造材料としてステンレス鋼や高Mn鋼等の低磁性鉄鋼材料のほかに、Al合金やFRP等が候補に挙げられている。



おわりに

今後、大きな市場の形成が予想される超伝導強電応用技術のうち、素粒子加速器を中心に、磁気浮上列車・核融合・

電力貯蔵を取上げ、構造材料との関連について述べた。いずれも大量の構造材料が使用される技術対象であり、超伝導に特有な事象として極低温／非磁性／強磁性(鉄鋼)材料が同時多面的に使用される。加速器向超伝導磁石用構造材料に関しては、新たに開発された新鉄鋼材料の材質や加工性、磁石性能の一端をも紹介した。(鉄鋼)構造材料がこのような先端分野の一翼を本格的に荷う日の早期到来を希ってやまない。

参考文献

- 1) ISTEC：超伝導技術の現状と実用化に関する報告，(1993)
- 2) 野原清彦，奥村嘉賀男，佐藤信二，野村武人：まてりあ，33(1994)，457.
- 3) 米国フェルミ国立加速器研究所報告 (1995)
- 4) スイス大使館：CERN(欧州合同原子核研究機関)紹介パンフレット.
- 5) ICFA(将来加速器国際会議)，つくば (1996)
- 6) CERN COURIER，34(1994)，22.
- 7) 新富孝和：低温工学，31(1996)，418.
- 8) 高エネルギー加速器研究機構：長基線ニュートリノ振動実験，(1996)，21.
- 9) SR産業利用関連技術国際会議，姫路 (1995)
- 10) K. Nohara and Y. Habu：Proceeding of ASM INTERNATIONAL，(1988)，33.
- 11) K. Nohara, K. Okumura, S. Sato, and H. Sasaki：Supercollider 4, Plenum Press, (1992)，1055.
- 12) K. Nohara, S. Sato, T. Nomura, R. Tachibana, T. Higashino, K. Okumura, and H. Sasaki：Supercollider 5, Plenum Press, (1994)，233.
- 13) K. Nohara, U. Nishiike, K. Suzuki, T. Mori, K. Okumura, H. Terami and H. Sasaki：Supercollider 4, Plenum Press, (1992)，1065.
- 14) K. Nohara, K. Okumura, and H. Sasaki：CEC/ICMC, Columbus, (1995)
- 15) K. Nohara, U. Nishiike, T. Kobayashi and T. Akita：5th EPAC, Barcelona, (1996)
- 16) K. Nohara, U. Nishiike, K. Kobayashi, and T. Akita：CEC/ICMC, Portland, (1997)
- 17) JR関係資料，ヒヤリングより.
- 18) H. Nakajima, K. Yoshida, and S. Shimamoto：ISIJ International, 30(1990)，567.
- 19) 奥村嘉賀男，野原清彦：超伝導電力貯蔵に関するシンポジウム，東京，(1993)

(1998年4月8日受付)