

超電導超大型粒子加速器 (SSC) 計画における 技術と材料

新富孝和*・石丸 肇*²・海野義信*³・新井康夫*⁴
渡瀬芳行*・尼子勝哉*³・近藤敬比古*

Technology and Materials for the Superconducting Super Collider (SSC) Project

Takakazu SHINTOMI, Hajime ISHIMARU, Yoshinobu UNNO, Yasuo ARAI,
Yoshiyuki WATASE, Katsuya AMAKO and Takahiko KONDO

1. はじめに

SSC は Superconducting Super Collider (超電導超大型粒子加速器) の略称で、すでに米国テキサス州で建設が始まっている素粒子物理研究用の加速器である。超電導電磁石約 1 万台からなる 2 つの陽子リングを周長 87 km の地下トンネルの中に設置して超高エネルギーの陽子・陽子衝突を実現させる。この加速器は人類が作る最大の機械となる¹⁾。

SSC 加速器と実験装置には色々なハイテク技術や材料が使われる。ここではその中から、超電導電磁石、超高真空ビームパイプ、シリコン半導体検出器、VLSI の使用と超高密度実装、高速大量データ処理システムを取り出してそれぞれの概要を述べる。

2. SSC の目的, 加速器, 実験装置

自然界の物質は何からできているのだろうか? この人類始まって以来問われ続けてきた疑問に答える学問の最先端が素粒子物理学である。物質を細分化していくと、分子、原子、原子核、陽子の順で階層構造になっている。最近では次の物質の階層がクォークとレプトンであることが分かってきた。これらの素粒子に働く力に 4 種類 (強い力、電磁気力、弱い力、重力) がある。そのうちの電磁気力と弱い力は同じ起源からのものという「電弱理論」は、全ての実験にぴったり合う。しかしこの理論の核心のヒッグス理論が全く謎のままである。今ある加速器の 10 倍のエネルギーが実現できればこの謎は解けることが分かっている。ヒッグス理論の解明は物理学が

直面する大問題で、相対性理論、量子力学、パリティ非保存などの大発見に匹敵する。SSC はそのために計画された加速器である。

SSC では周長 87.1 km, 平均深度 60 m のドーナツ状地下トンネルの中に 2 つの陽子貯蔵リングが設置される (図 1)。リングは主に超電導電磁石と超高真空ビームパイプからなる。ビームパイプの中を 20 兆電子ボルトのエネルギーまで加速した陽子約 100 兆個がグルグル回る。電磁石はこの光速に近い陽子を磁場で曲げる役目を持つ。陽子のエネルギーが非常に高いので、超電導を利用して磁場を強くしても一周に 87 km も必要になる。2 つの陽子ビームは 4 箇所の衝突点で交差して陽子・陽子衝突が実現される。入射用加速器群は、線型加速器と 3 台のブースタシンクロトロンで構成される。

衝突点の地下実験室には実験装置が設置される。実験装置で陽子・陽子衝突から発生する粒子を測定し、新粒子の発見や高エネルギー物理現象を研究する。実験装置は 3 万トンで大型でかつ複雑な測定器の集合体である (図 2)。

3. 超電導電磁石

超電導電磁石のシンクロトロン加速器における大規模利用は、米国のフェルミ国立加速器研究所の加速器テバトロンに始まる。その後、表 1 に示すように世界で次々と建設計画が立てられた。HERA の超電導電磁石は初めて企業で大量生産されたものである。

大型粒子加速器が超電導化されるのは、銅と鉄の普通の電磁石の数倍の高磁場を発生できるだけでなく、省エ

平成 3 年 12 月 3 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Dec. 3, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)(依頼解説)

- * 高エネルギー物理学研究所教授 理博 (National Laboratory for High Energy Physics, 1-1 Oho Tsukuba 305)
- *² 高エネルギー物理学研究所教授 工博 理博 (National Laboratory for High Energy Physics)
- *³ 高エネルギー物理学研究所助教授 理博 (National Laboratory for High Energy Physics)
- *⁴ 高エネルギー物理学研究所助手 理博 (National Laboratory for High Energy Physics)

Key words: SSC; accelerator; elementary particle physics; proton beam; high technology; advanced materials; superconducting magnet; silicon detector; VLSI technology; high-speed large-scale data acquisition system.

表1 大型超電導粒子加速器のパラメータ

粒子加速器名 研究所(国)	TEVATRON FNAL(米)	HERA DESY(独)	UNK SERP(ソ)	SSC SSCL(米)	LHC CERN(ス)	RHIC BNL(米)
粒子エネルギー [TeV]*	0.9	0.82	3	20	7.7	0.1/amu
加速器周長 [km]	6.3	6.3	20.8	87.1	26.7	3.8
加速器リング数	1	1	1	2	2	1
双極磁石磁界 [T]	4.4	4.7	5	6.6	10	3.5
長さ [m]	6.1	8.8	5.8	15.8/13.3	9.0	9.7
個数	774	416	2194	7964/496	1792**	288
コイル内径 [cm]	7.5	7.5	8	5	5	8
4極磁石磁界勾配 [T/m]	76	91	17	206	250	72
長さ [m]	1.7	1.5~1.9	3.7	5.9/7.7	3.1	1.1
個数	216	256	496	1664/72	618**	276
超電導体	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
冷却温度 [K]	4.5	4.5	4.4	4.4	2	4.5
完成(予定)年	1985	1990	1995	1999	1998	1996

* TeV=1×10¹²eV=1兆電子ボルト

** 1台の磁石に2個のコイルが入っている。

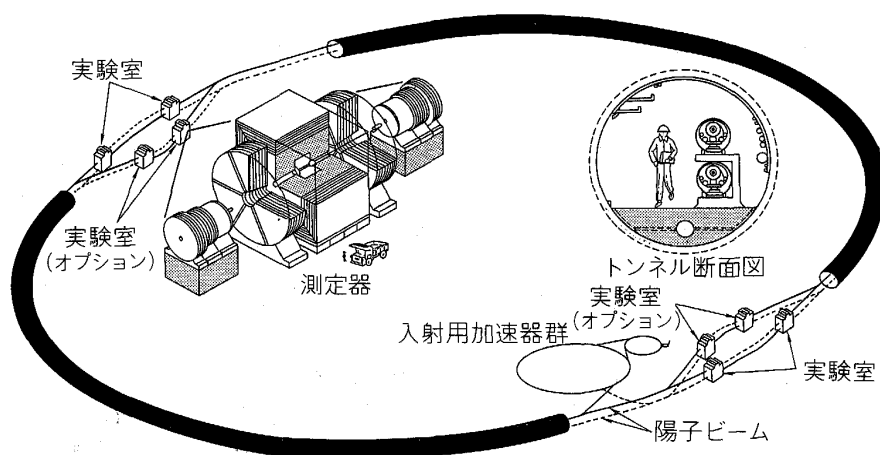


図1 SSC加速器, 測定器, トンネルの概念図

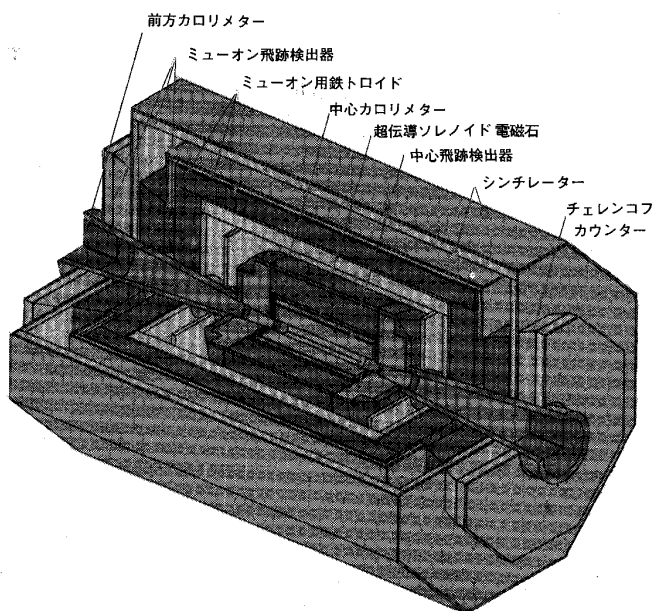


図2 実験装置 SDC (Solenoid Detector Collaboration) の外観図

エネルギーにもなるからである。もし SSC を普通の電磁石で作ると運転に 4000 MW の電力がいる。超電導を用いるとわずかに 30 MW ですむ。主リングには長さ 15.8 m 長の双極電磁石が 7964 台, 13.3 m 長のものが 496

台, 四重極電磁石が 2024 台設置される。設計と製造のキーポイントは次の 3 点である:

1. 高い精度の均一磁場
2. クエンチ†に対する安定性
3. 低い製造コストと品質管理

表2に超電導電磁石の製造に必要な材料の量をまとめた。

(1) 電磁石の構造²⁾

SSC用双極電磁石では 6.6 テスラの磁束密度を長さ 15 m に渡って 0.01% 以下の磁場均一度で作る。高精度の均一磁場はビームを安定に回すために要求される。均一磁場を得るために、コイル配置を $\cos \theta$ 型(楕円交差型)にする。 $\cos \theta$ 型配置での中心の磁束密度 B_0 は

$$B_0 = \mu_0 \cdot J \cdot C / 2$$

で与えられる。 J はコイルの平均電流密度, C は交叉する 2 つの楕円の中心のずれである。この配置にすればコイル内部の空間の磁場は原理的に均一となる。Q マグネットでは $\cos 2\theta$ 型の配置になる。実際には製作上 2 重シェル構造と呼ぶ近似配置にする(図3)。そのため

† ここでクエンチとは焼入れの事ではなく、超電導線の μm オーダのわずかな動きなどの擾乱で発熱し、超電導状態が破れ、コイル全体が急速に常電導に転移する現象をいう。多くの電磁石を必要とする超電導加速器ではクエンチが極力起こらない電磁石の開発が重要である。

表 2 SSC 用超電導電磁石に必要な材料

	コライダ (MR)		高エネルギーブースター		
	双極電磁石	4 極電磁石	双極電磁石	4 極電磁石	
台数	8 460	1 736	432	278	(台)
超電導ケーブル (NbTi)	980	45	50	2	(トン)
カラー材	6 400	420	330	15	(トン)
ヨーク材	64 000	2 500	3 300	90	(トン)
Superinsulation	10 000 000	800 000	500 000	30 000	(m ²)

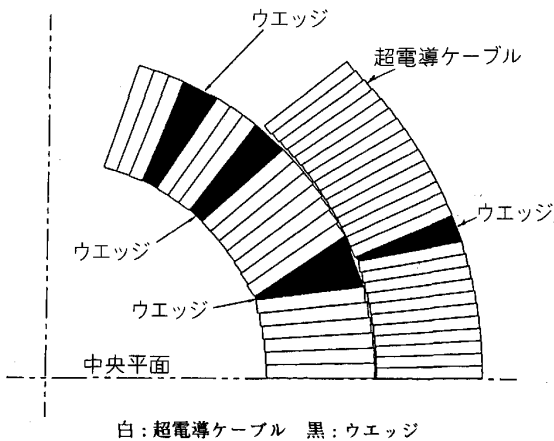


図 3 コライダ用双極超電導電磁石のコイルの 1/4 断面図

磁場の高次調波が出てくるが、内層と外層のコイル配置、ウエッジ (くさび) の位置などを調節して高次調波を打ち消して均一磁場にする。このため高い工作精度が要求される。例えば、コイルの位置精度は 25 μm 程度であり、超電導ケーブルの製作許容誤差は 10 μm 以下である。

コイルの外側にはコイルにかかる電磁力を支えるステンレス鋼製のカラーと呼ばれる部材、その外側に純鉄製のヨークがくる。一番外側をステンレス鋼のヘリウム容器が取り囲む。全体は 4.4 K に冷却され、熱侵入を防ぐために 20 K のヘリウムと 80 K の液体窒素シールドで遮蔽する (図 4)。

(2) 超電導線とケーブル

超電導コイルは NbTi 合金の細いフィラメントを安定化用銅に数千本埋め込んで線材とし、それを約 30 本撚線したケーブルを用いて製造される。これをラザフォード型ケーブルと呼ぶ (図 5)。超電導線には磁化のヒス

テリシスがあるため、励磁と減磁の時で磁場均一度が変化する。これは磁場が低い程大きく、入射時のbeam安定性に影響する。これを軽減するため、限界に近いフィラメント径として 6 μm を選択している。線材の性能向上が 1984 年より SSC のために行われ、最大許容電流密度 Jc が要求仕様である 4.2 K, 5T で 2 750 A/mm² を十分超えるものが量産化できるようになった (図 6)。高磁場を発生するため、安定化銅を少なくしてコイルの平均電流密度を高く (400~500 A/mm²) とってある。そのためわずかな超電導線の動きで発熱しクエンチが発生してしまうので、クエンチの極力起こらない磁石の開発がなされている。ケーブルは 25~50 μm 厚の耐放射線性をもつポリイミド系のフィルムで絶縁される。

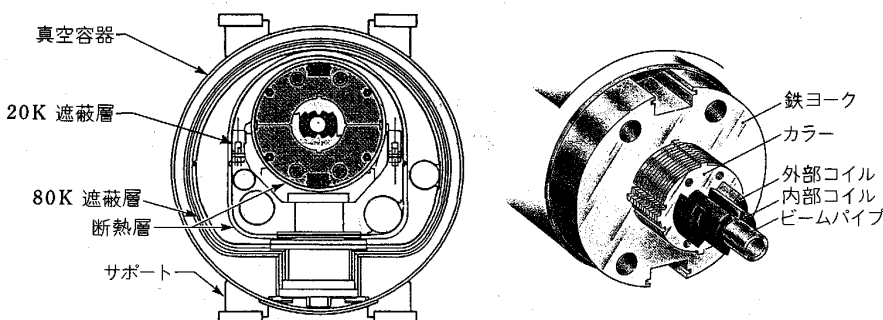
(3) カラー材

電流を流すと発生する磁場のためにコイル自身に強大な電磁力がかかる。この電磁力による超電導コイルの動きを極力少なくすることが、クエンチの発生を防ぐために必要である。コイルはカラー材でプリストレスをかけたがり押しやる。

カラーに発生する応力は、有限要素法での計算によれば最大約 20 kg/mm² であり、かなりの高強度材料の必要があり、超電導線と同様に開発研究がされている。また、低温での靱性も問題である。

カラーはコイルに直接接しているため、透磁率が磁場均一度に影響する。304 L のように透磁率が 1.01 を超えると磁場均一度に影響を与え使用できない。

プリストレスの大きさは、12~13 kg/mm² である。電磁力のためにコイルは円周方向に圧縮され、プリストレスが減少し、ついにはコイルを抑える力がなくなり、線材が動きクエンチする。プリストレスの大きさは、線材の絶縁材の耐力限界 (約 20 kg/mm²) に近い大きさであるので、プリストレスをできるだけ低くする必要があ



左: 全体断面図 右: ヨークとコイル
図 4 コライダ用双極超電導電磁石の外観図

表 3 カラー用候補材の特性

(温度)	高 N ステンレス鋼 ³⁾	高 Mn 鋼 ⁴⁾	316LN	304L	7075-T6	Ti-6Al-4V
YS (MPa)	300 K 4.2 K	490 1670	980 2150	350 1010	222 300	840 1700
TS (MPa)	300 K 4.2 K	820 1950	1180 2460	660 1530	600 1600	910 1800
EL (%)	300 K 4.2 K	45 20	33 29	48 43	82 44	10 10
vL (J)	300 K 4.2 K	260 79	274 135	290 120	310 145	30 10
ヤング率 (GPa)		192	191	185	193	73
線膨張係数 ($10^{-6}/K$)**		11.6	7.5	12.5	12.5	17.4
電気抵抗 ($\mu\Omega$ cm @ RT)		79	85	78	72	55
透磁率	300 K 4.2 K	1.002 1.002	1.001 1.001	1.003 1.013	1.01 1.01	1.00 1.00

*77 K の値 **77 K-300 K の平均値

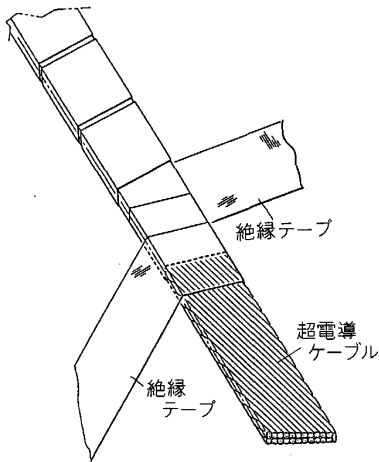


図 5 ラザフォード型超電導ケーブル

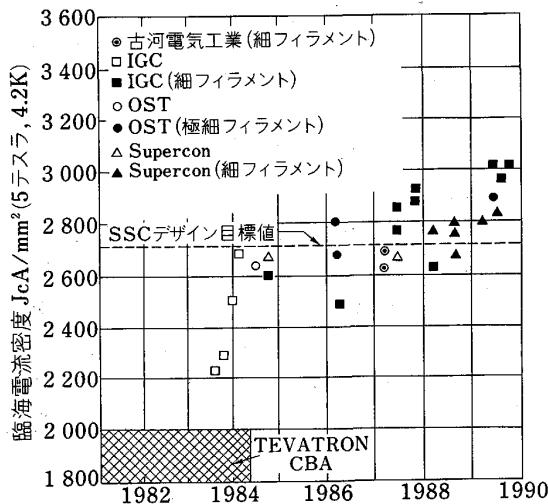


図 6 超電導線の最大許容電流の進歩

る。ところが常温から液体ヘリウム温度に冷却するとコイルとカラー材の線膨張係数の差のためプリストレスが減少する。できるだけこの差が小さい材料が望ましい。アルミ合金はその点で好ましく、事実 HERA の電磁石のようにアルミ合金をカラー材に使っている例もある。高 N ステンレス鋼をカラー材に用いると、熱収縮率の

クエンチ履歴

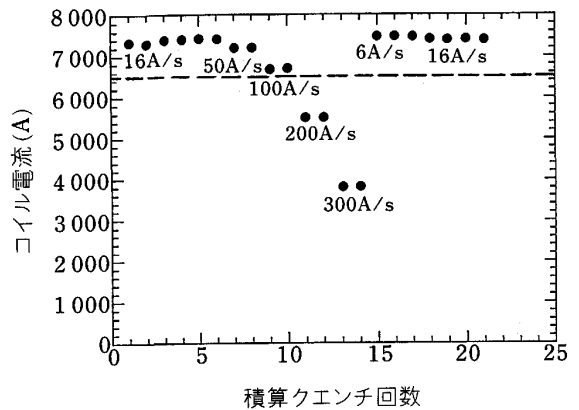


図 7 SSC 用超電導電磁石のテストで得られたクエンチ曲線。縦軸はクエンチが起こった時の電流値。破線は目標磁場 6.6 テスラに相当する電流値で 6500 A。図中の数字は励磁電流の上昇率。

差は 0.1% であり、約 1 kg/mm^2 のプリストレスのロスとなる。

製作性と工作精度 ($25 \mu\text{m}$) からカラー材は 1.5 mm 厚みの打ち抜きで作ったものを積層して用いる。打ち抜き加工性のよさが必要となる。また打ち抜いた面にフェライト相が出ない安定な材料であることも要求される。それ以外にもカラー材には経済性も含めて優れた特性が要求される。

カラー材として候補に上がっているものを表 3 に示す。この表には 316 LN, 304 L アルミ, チタン合金も比較のために上げてある。

(4)ヨーク材

ヨーク材は、電磁気特性のよい純鉄系の電磁鋼板が使われる。現在検討されているものは 10 C 相当の純鉄である。ロット間での電磁特性のばらつきは電磁石間のばらつきを招くので、特性のそろった材料を要求する。このような電磁鋼板では低温での磁気特性に関する測定データが少なく、低温データを整備することも重要である。

(5)開発の現状

SSC 用超電導電磁石の開発研究は 1984 年以來、米

国内の4研究所及び日本の高エネ研とで精力的になされてきた。17 m の長さの双極電磁石が約 30 台試作された。1989 年末にはビームの長期安定性を考慮して基本的な設計変更を行い、コイル内径を 4 cm から 5 cm に広げた。新設計による長さが 1 m の試作第 1 号機は高エネ研で製作され、1990 年 9 月に試験された。1991 年 11 月には実長の双極電磁石が米国の 2 研究所で完成し、最初のクエンチで設計電流値の 115% を達成した。図 7 にその励磁特性を示す。

双極電磁石の製作会社である General Dynamics 社と Westinghouse 社は、1994 年 6 月までに 587 台の電磁石を生産し、量産化技術を修得することになっている。

SSC の建設が正式に認可されるためには、1992 年 10 月までに 5 台の実機双極電磁石を連結して冷却、励磁するストリングテストに成功することが条件である。

4. 超高真空ビームパイプ

100 兆個の陽子のビームを 10 時間以上も貯蔵しておくため 10^{-10} Torr 以下の超高真空が必要となる。ビームパイプは超電導電磁石の中心に組み込まれ、液化ヘリウムで冷却されて、ビームパイプ自身がクライオポンプになっている。陽子ビームからは約 200 電子ボルトの臨界エネルギーを持ったシンクロトロン放射光が出てくる。これが当たりビームパイプは加熱されてしまう。この放射光のパワーは超電導電磁石を冷却するパワーと同程度である。そのため液化ヘリウムをつくる冷凍機のパワーが 2 倍必要になりコストが上がる。この問題を解決するために、ビームパイプの内側に液化窒素で冷却したライナーと呼ばれる金属のパイプを組み込む案が提案されている。

この他に真空システムには、冷却による収縮を吸収するベローズ、ビーム位置モニター、周長 87 km のビームパイプを約 1 km の区間に分割するゲートバルブなどが付随する。真空排気用にターボ分子ポンプ、液化ヘリウムを流していない場合に高真空に保持するためのイオンポンプも設けられる。超電導電磁石を冷却するための液化ヘリウムや液化窒素のパイプ 4 本と、熱放射のシールド板が必要で、これらも真空装置の一部である。さらに超電導電磁石を囲んで断熱するための真空容器も必要である。

ビームパイプはビームのつくる壁電流をスムーズに流すため、導電性のよい金属材料が要求される。ステンレス鋼に銅の内張りをしたものが候補である。ベローズはステンレス鋼の成型で内面にベリリウム銅の RF シールドを設けている。位置モニター用の同軸真空端子はステンレス鋼とセラミックで気密封止型である。ゲートバルブはメタルシール方式でステンレス鋼を主材料としている。これらはみな超高真空、極低温の仕様とともに、高い放射能レベルでの耐久性も要求される極めて高度な

技術である。当然のことながら、多くのコンポーネントの信頼性は最も重要な課題である。

SSC の真空系の設計当初、ビームパイプ材料としてアルミ合金が第一の候補であった。トリスタン加速器の真空システムの建設を契機に経験を積んだアルミ合金の超高真空システムを提案し、また高エネ研で SSC 要求仕様に適合する試作品ができていた。しかし米国にはアルミ合金超高真空の経験がないことと、実績主義と米国の技術で作るという政策的な観点から現在ではステンレス鋼が第一の候補になっている。

5. 実験環境

SSC では超高エネルギーの陽子同士が衝突して、クォークやグルーオン、W 粒子などの基本素粒子が発生する。それらは非常に短時間で崩壊し、パイ中間子など 100-400 個もの粒子となる。これらの発生粒子のエネルギーや種類を測るために、衝突点の周りに磁場をつくり種々の検出器を配置する。電気を帯びた粒子が通過するときに出る微小電気信号の時間と位置を精度よく測定すれば通過粒子の飛跡がわかる。鉄とシンチレーターのカロリメーターの中ではシャワーが発達し、シンチレーター光の強さを測ってエネルギーがわかる。これらの情報から衝突直後の短時間に生成された親粒子の存在とエネルギーを求めて、その生成の物理の探求や新粒子発見ができる。

検出器は広い空間に分布し多数のセンサーからなるので信号の数は数十万から百万チャンネルにのぼる。陽子同士の衝突頻度は 1 億回/秒で超高速のデータ処理能力が必要になる。そのために VLSI の応用と高速並列計算機が不可欠である。また SSC 実験装置の内部に置く電子回路で大事な条件は、放射線耐性である。ガンマ線、中性子、荷電粒子が多量に発生するので、使用する部品は全てこれらの放射線に対して十分強くなければならない。

6. シリコン半導体検出器

粒子の飛跡を検出する中核となるのが急速に発展しているシリコン半導体検出器である。これは LSI 製造技術を用いて高純度のシリコンウェハー上に線状 PN 接合を 50 μm ピッチで作る (図 8)。荷電粒子が通過すると出る信号を記録して通過位置を精度 15 μm で測定する。従来の細いワイヤーを用いた検出器に比べ 10 倍良い精度と分解能があるので衝突点近傍で使用できる唯一の検出器である。

SSC 実験では、17 m^2 以上の大量のシリコン半導体検出器で衝突点を幾重にも囲む。高い位置精度を実現するには支持構造体にも 15 μm 以下の精度がいる。しかし通過粒子の邪魔にならないためには構造体は極力軽くなくてはならない。高精度かつ超軽量の支持構造は、高

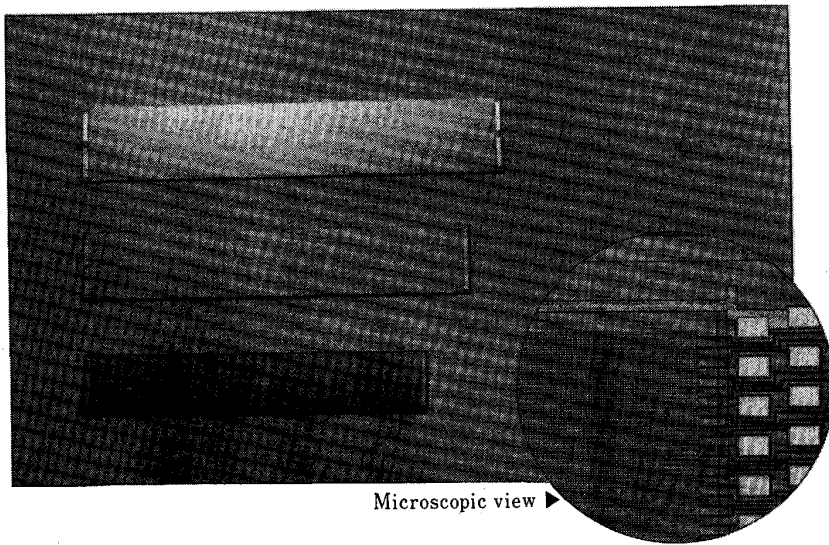


図 8 シリコン半導体検出器

弾性カーボンファイバー、高弾性フォーム材、高弾性メタルマトリックス等、最新の材料を使用することによって実現される。精度を維持するためミクロンオーダーのレーザー測距、ガンマ線による校正等の最新測量技術が必要とする。

50 μm おきに信号を読み出すのでチャンネル数は膨大で全部で一千万に迫る。信号処理回路は数十 MHz の高速性が要求される。全体の発熱量を押さえるため回路をいかに低消費電力型にするかがキーポイントで、専用の超 LSI の開発が進んでいる。これらの超 LSI は衝突点から 10~40 cm という近くに配置されるため年間の放射線レベルが 0.1~1 MRad にも達する。

デジタル処理された信号は、光ファイバーで検出器外へ伝送される。野心的には、千万チャンネルの信号を光波長軸及び時間軸に多重化して、光ファイバーにて検出器外へ伝送する提案もある。最近、技術発展が著しい光マイクロエレクトロニクスの出番であろう。

7. LSI の使用と超高密度実装

十萬から数百万の信号チャンネルを直接ケーブル等で外に取り出すのはほとんど不可能である。このため実験装置内部でデータ処理を行い、必要なデータだけを多重化して外に取り出す。複雑な実験装置の内部に、大量のエレクトロニクスを置くので、高密度、低消費電力であることはもちろん、耐放射線性に優れ信頼性の高いものを作らなければならない。

測定器からの信号は通常非常に小さいレベル (~1 fC) なので、各チャンネルには信号を増幅・整形するための高速増幅器が必要となる。その後にはアナログ量をデジタルに変換する ADC や時間情報をデジタルに変換する TDC が来るが、16 ns 毎に起こる陽子・陽子衝突のデータを全て取り出すことは不可能なので、物理的に重要度の高い事象が起こったときのみデータを取り出す。こ

の判断のためのトリガー回路に約 4 μs 必要とされるので、この間データはローカルに蓄えておく。チップ内に作った多数のコンデンサーに順次スイッチを切り替えてアナログ信号を蓄積するスイッチド・キャパシターアレイ SCA¹² や、時間情報を高速記録するタイムメモリーセル TMC 等が開発されている。

TMC は高エネ研と NTT LSI 研の共同研究で開発された¹³。4 M ビット DRAM と同じ 0.8 μm ルールの CMOS を使用して作られており、1 ns 単位で入力信号をデジタル化し記憶する。約十萬トランジスターを 5.0 mm \times 5.6 mm のチップに納めており、写真を図 9 に示す。

実験装置内部は、多くの測定器等が複雑に配置されているため、エレクトロニクスが置けるスペースは非常に限られている。例えば、中央飛跡検出器として考えられているストロー型ワイヤー検出器では使用できる面積の約 30% がシリコンで埋め尽くされることになる。このため最先端技術の超高密度実装が要求される。また放射線に強い素子 (ラドハードデバイス) でなくてはならず、その技術は特殊半導体の最先端技術の一つで、米国が軍事宇宙用の開発を通じて圧倒的に進んでいる。

8. 高速大量データ処理システム

検出器からの信号の波高値または時間差は、測定器内部かその近辺でデジタル化される。一事象に対応するデータは約 1 MB¹⁴ の大きさである。それらはトリガー形成のため一時仮蓄積された後、光ファイバーで地上に送られる。地上ではオンライン計算機でフィルターさ

¹² 超高速アナログ信号を多数並列処理する VLSI でバークレイ研究所で開発されている。Sampling rate 90 MHz, 12 bit digitization, Linearity < 0.01%, Dynamic range 13 bit.

¹³ この微小時間差測定チップは CMOS メモリーの技術をうまく利用した高速、低消費電力の画期的なもので特許を申請している。物理研究者が IC 設計を勉強習得し NTT 研究所の協力で開発が成功した。

¹⁴ 1 MB は百万バイトすなわち 8 百万ビットの情報量のこと。

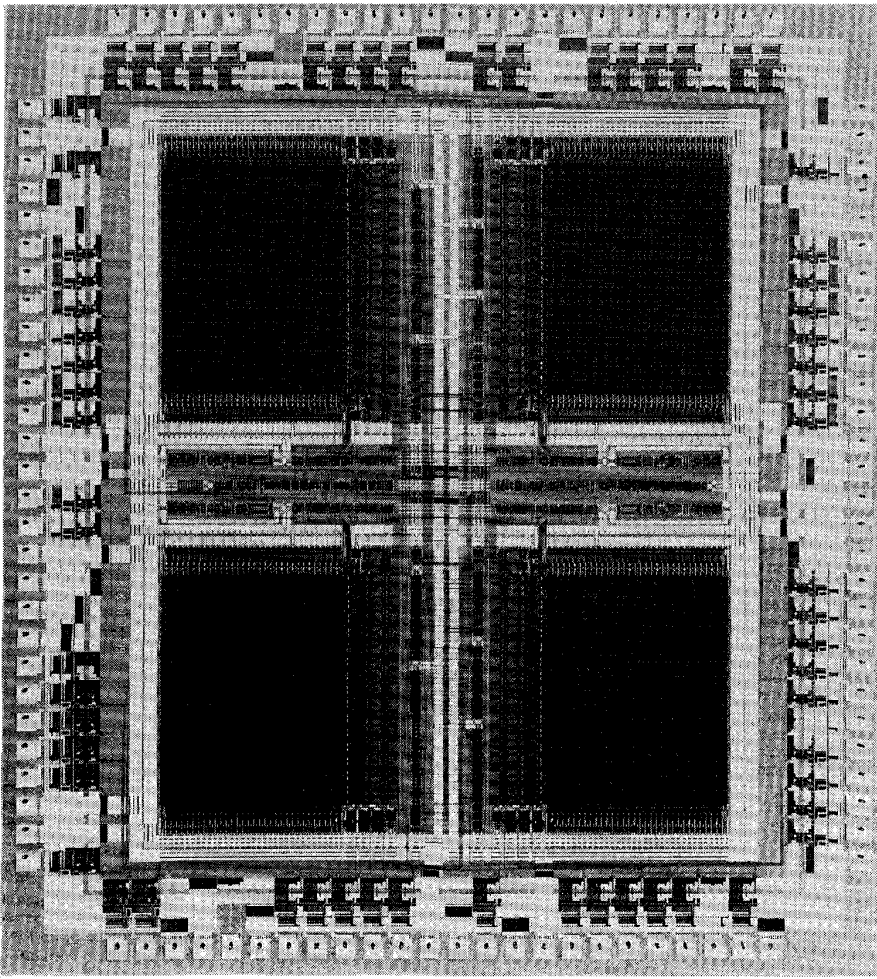


図9 高・エネ研と NTT LSI 研の共同研究で開発された TMC チップ

れた後、記録される。データのオフライン解析は数段階に分かれるが、最終的には世界の研究者に提供される。

(1) 光転送とスイッチネットワーク

測定器からのデータは検出器毎に実験装置内部かその近くで一時的なバッファに蓄えられる。その中から有効なトリガーに対応する事象のデータのみが、総計約 400 本の光ファイバーを用いた光データ転送システムにより計測室に送られる。この転送には 1 MB のデータが最大 10 kHz で送られる容量が必要で、全データ転送レートは最大 10 GB/秒が要求される。光ファイバー当たりの転送容量は 25 MB/秒が必要となり、1 G ビット/秒の転送能力のある光ファイバーリンクを用いる。400 本の光ファイバーによって分けて送られて来るデータは一塊の事象データにまとめられる。この機能を事象データ構成 (イベントビルダー) と言う。このために使われる新技術が高速スイッチネットワーク用バレルシフターである。400 の並行入力を一つの直列データに素早くまとめ上げ、いくつかある出力チャンネルの一つに出力する。このデータは次の第三段階のトリガーであるオンライン計算機ファームに渡される。

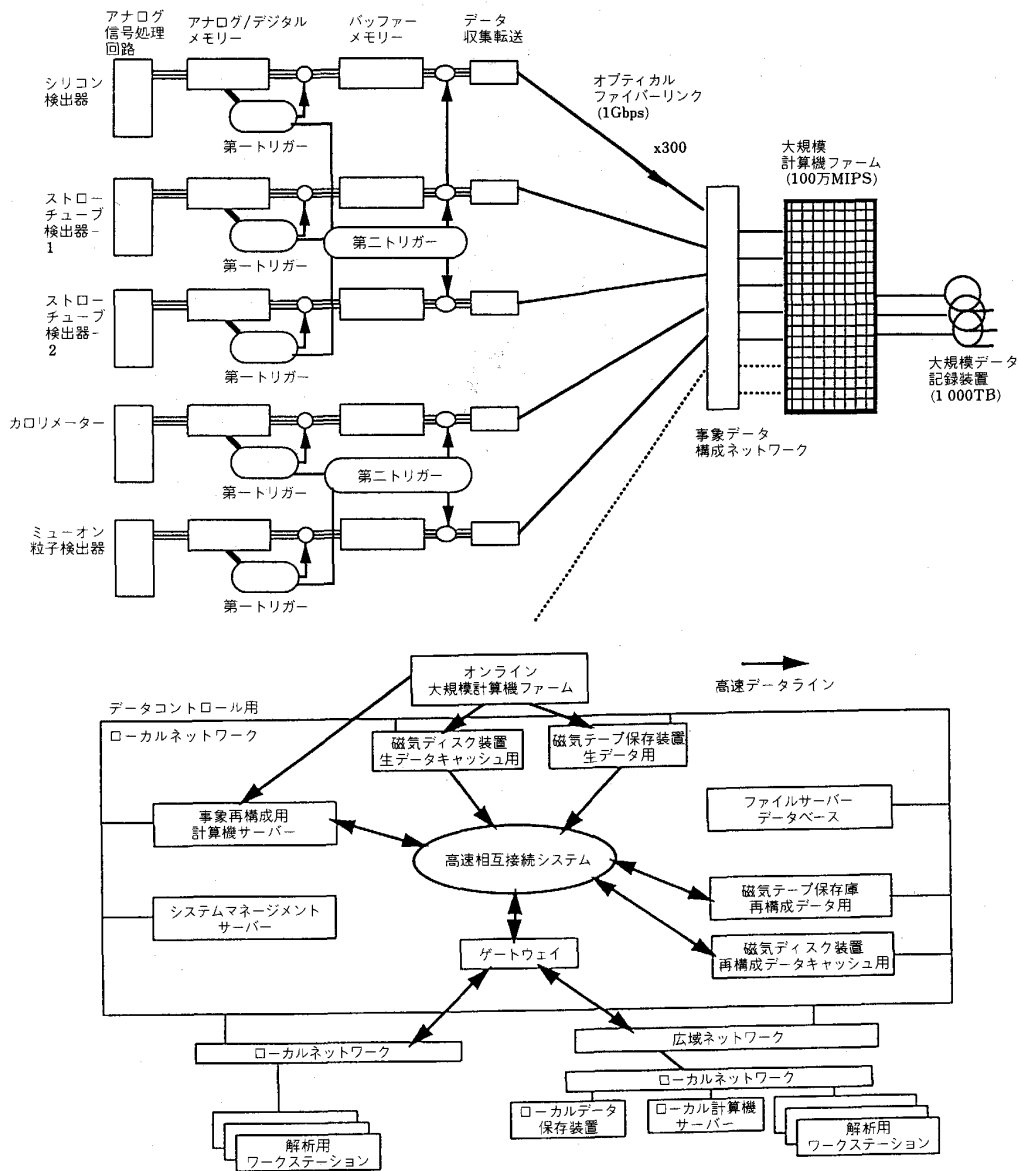
(2) オンライン計算機ファーム

平均 1 kHz の頻度で送られてくる事象当たり 1 MB のデータを解析処理して、バックグラウンド的な事象を落として 100 Hz 以下の頻度に絞るのがオンライン計算機の役割である。各事象の解析処理には 1 000 MIPS¹⁵ 相当の複雑な計算プロセスが必要である。毎秒一千個以上の事象が入ってくるので、総合性能で百万 MIPS の計算能力が必要である。データは相互に何等関係がないので、多数の高性能マイクロプロセッサを並列独立に動作させ、事象データ毎に別々に解析処理をする。100 MIPS のものを一万台並べることによって、総合性能で百万 MIPS を実現する。このような単純な並列計算機システムを計算機ファームという。実際のシステムのためには、データの入出力のための高速ネットワークによるプロセッサの接続と効率的な制御プログラムの開発も重要である。処理結果の記録も並列に行われる。

(3) オフラインデータ処理

上記のオンライン計算機ファームでの処理によりデータ頻度は最大 100 Hz に絞られる。このデータは図 10

¹⁵ MIPS は Million Instructions Per Second の頭文字をとったもので、1 秒間に処理する計算機の基本命令 (instruction) が百万回あることを示す単位。計算スピードの指標の 1 つで、現在の大型計算機は約 100 MIPS の能力をもつ。



上: オンラインデータ処理 下: オフラインデータ処理
 図 10 高速大量データ処理システム概念ダイアグラム

に概念を示すオフライン解析の出発点となり、その記録は生データとして永久的な記録媒体に行われる。一事象当たりのデータ量は約 1 MB なので生データの記録には最大 100 MB/秒の速度がある。記録しなければならないデータ総量は 1 PB (Peta Byte = 10^{15} Byte)/年に達する。このような高速大容量データの記録を現時点での技術を基礎に実現するには、高密度磁気テープ装置 (例: DD1 テープ) を多数並列使用する案がある。しかし以後のデータ解析の効率を考慮すると同一時期に取得されたデータが複数の媒体に記録されるより、単一媒体への記録ができればより良い。光テープは記録容量の点で磁気テープに比べて優れているが、記録スピードが磁気テープに比べると劣る。

記録された生データに対してはオフラインデータ解析

が、(1)陽子と陽子の衝突事象の再構成、(2)再構成情報を用いた特定事象の選択、及びそれらの情報の DST データ (Data Summary Tape) の作成、(3) DST を基礎にした物理解析、という順序で進められる。衝突現象の再構成には、一事象当たり 1000 MIPS・秒でデータ頻度は 100 Hz であるから 10 万 MIPS の総合 CPU 能力が必要となる。このシステムの実現には、オンライン計算機と同様に、100 MIPS 程度の計算能力をもつ CPU を並列使用する。一つの事象再構成は一つの CPU で独立な解析が可能なので、処理中の並列 CPU 間通信は必要ではなく、データの入出力のためにこれらの CPU が Local Area Network (LAN) 又は専用の高速スイッチによって結合されていけばよい。この様にして事象再構成された情報を用いて物理的に興味のある事象が特定さ

れ, DST に記録される. この段階でデータ量は生データの約 1/100 に縮小される. この DST データは実験の最終目的である物理解析の基礎になるので, 全世界に広がる共同研究者がそれぞれの物理解析のために DST データを利用する. この共同研究者の数は一つの実験につき約 1000 人の規模になり, DST データへ同時アクセスする研究者は 100 人程度と予測される. もし DST データが高密度磁気テープ等のシーケンシャルな媒体に記録されると, それへのアクセスにボトルネックが生じる. この問題はランダムアクセス可能な磁気ディスク等の媒体に DST データを記録すれば起こらないのだが, 10 TB の巨大なデータを全てランダムアクセス可能にすることは経済的に不可能である. 現在検討されている案は, DST データ全体を高密度磁気テープ等に記録すると共に, その記録情報及び個々の事象の要約情報を磁気ディスクにデータベースとして保存する機構である. これにより DST データの同一部分への同時アクセスの要求は一旦データベースを参照することで纏めることが可能となる. データ取り出しには大容量ディスクアレイバッファを設ける. 経済的な大容量ディスクアレイバッファを用意するにはディスクアレイ技術の進歩が必要である. データアクセスのボトルネック軽減の別手段として, 実験に参加している世界各地の研究機関にデータ保存機構を設置し, データアクセスを分散させることも考えられる.

オフライン解析の最終段階では, 保存された DST データを研究者が各自のワークステーション上で処理し物理的結果を引き出す. ここで最も問題となるのはネッ

トワークの性能である. それぞれの研究者のワークステーションと DST 保存機構との間は, 少なくとも FDDI 程度のネットワークで結ばれる必要がある. 現状では FDDI の速度を持つ広域ネットワークを実現するのは経済的に不可能であるが, 現在の技術進展からみて SSC 実験が開始される時点においてはそれは実現できると考えられる.

9. おわりに

SSC 加速器については超電導電磁石と超高真空ビームパイプを, 実験装置中からはシリコン半導体検出器, VLSI の使用, 高速大量データ処理システムを取り出して, その技術や材料について述べた. 色々なハイテク技術や特殊材料が使われるので産業界との協力が不可欠である. 加速器と実験装置の建設はオープンな国際協力のもとに進められることを付記しておく.

文 献

- 1) 近藤敬比古: 日本物理学会誌, **46** (1991), p. 742
近藤敬比古: 原子力工業, **37** (1991) 10, p. 43
- 2) J. Peoples, IEEE Trans. on Magnetics, MAG-25 (1989), p. 1444
- 3) H. Sumitomo, J. Nakatuka, T. Sunami, M. Tuji, T. Matumoto and K. Toshima: Development of High Strength Non-Magnetic Stainless Steel for the SSC, Collider 3 (1991), p. 117 [Plenum Press]
- 4) K. Nohara, K. Okumura, S. Sato and H. Sasaki: Cryogenic Toughness and Welding of High Manganese Non-Magnetic Steel: Application to the SSC Dipole Magnet, Collider 3 (1991), p. 75 [Plenum Press]