

粒子測定器用大型薄肉超電導ソレノイド

Indirectly Cooled Large Thin Superconducting Solenoid for the Collider Detector Facility

粒子測定器用大型超電導ソレノイド「CDFソレノイド」の製作が、日米協力プロジェクト(筑波大学・文部省高エネルギー物理学研究所・米国フェルミ国立加速器研究所)の一環として進められており、日立製作所は、このたび製作及び試験を終了した。

CDFソレノイドは、実験の目的上、大型の薄肉構造とすることが要求される。これに対応するため、各種の解析と試作試験による実証を通して、構造設計・冷却方式・材料の選択、更には製作方法も含めて、広い分野にわたって新技術を開発した。これらを駆使して製作されたCDFソレノイドは、この種のソレノイドでは世界最大級のものである。本論文では、主要構成要素の設計の内容と特性試験結果について概説する。

近藤都登* Kunitaka Kondō
 森 茂樹* Shigeki Mori
 吉崎亮造** Ryōzō Yoshizaki
 斎藤龍生*** Ryūsei Saitō
 浅野克彦*** Katsuhiko Asano

1 緒 言

「CDF(Collider Detector Facility)ソレノイド」は、米国のフェルミ国立加速器研究所のPP衝突型加速器「テバトロン」の粒子検出装置の一部として組み込まれるものである。

近年、大型加速器の主流が衝突ビーム型のものに移行しつつあるが、この種の加速器では衝突によって発生・散乱する粒子のエネルギーが高いため、これを取り巻く検出装置も大型化する。大型ソレノイドは、散乱粒子の運動量を測定するための磁場を発生するものであるが、比較的高いエネルギーの荷電粒子や中性粒子はこれを透過し、外側の検出器でそのエネルギーを分析する。したがって、検出精度を向上させるため、ソレノイドはできるだけ径方向厚さを薄くすることが必要とされる。更に所要電力の節減とある程度高い磁場が要求されることから、大型薄肉超電導ソレノイドが必要となる。

この状況に対応し、昭和56年のモデルコイルによるアルミ安定化超電導導体技術と間接冷却技術の実証^{1),2)}、更に昭和57年から58年の詳細設計と^{3)~5)}、大型薄肉化技術の実証^{6),7)}を経て、CDFソレノイドが製作された。

この種のソレノイドは、これまでに世界的にも製作例が少なく、寸法・エネルギー的に世界最大級となることに加えて、構造的にも新規なものとしたことにより、技術的な開発課題が多く設計・製作には多くの問題点をもっていたが、前述の開発ステップにより成功裏に製作されたものである。

2 CDFソレノイドの概要

CDFソレノイドは図1に示すように、他の検出装置、ヨークとともに加速器のビーム衝突点を囲むように設置され、生成された粒子の軌道から、粒子の電荷の符号、運動量を求めるために均一磁場を広い空間にわたって発生させるものである。

200 μ の位置分解能を設定して、垂直方向の運動量分解能を50GeV/Cで、15%の精度で測定するために、直径3m、長さ3.5mの有効空間に対し1.5Tの均一磁場を発生することが要求される。更に、CDFソレノイドの外側にエネルギー分析装置が設置されるため、CDFソレノイドには輻射長^{*})を小さく

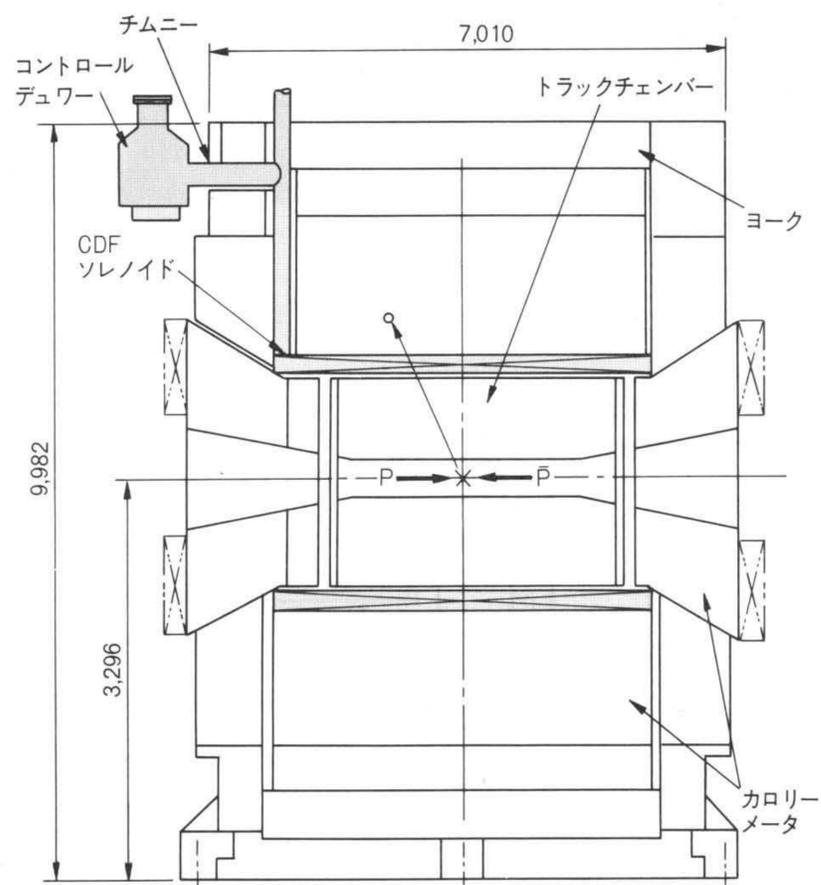


図1 CDFシステム 中央部で衝突により発散・散乱した粒子は、CDF(Collider Detector Facility)ソレノイドの発生する磁場によって軌道を曲げられ、トラックチェンバーにより検出される。

するように物質量の少ない薄肉構造が要求される。CDFソレノイドの基本性能諸元を表1に示す。

CDFソレノイドは大別して、コイルとクライオスタットから成る本体と、電気及び冷媒の導入部となるコントロールデューワー及びチムニーから構成されている。CDFソレノイドの

* 輻射長 高エネルギーの電子が物質を通過するとき、輻射過程でエネルギーが $\frac{1}{2}$ まで減少する平均距離を言う。

表1 CDFソレノイド主要諸元 蓄積エネルギーが高く、大型で薄肉であることが特徴である。

項目	数値
内径寸法	2,858mm
外径寸法	3,353mm
軸長	5,067mm
中心磁場	1.5T
起磁力	5.82MAT
蓄積エネルギー	30MJ
放射長	0.83
重量	13t

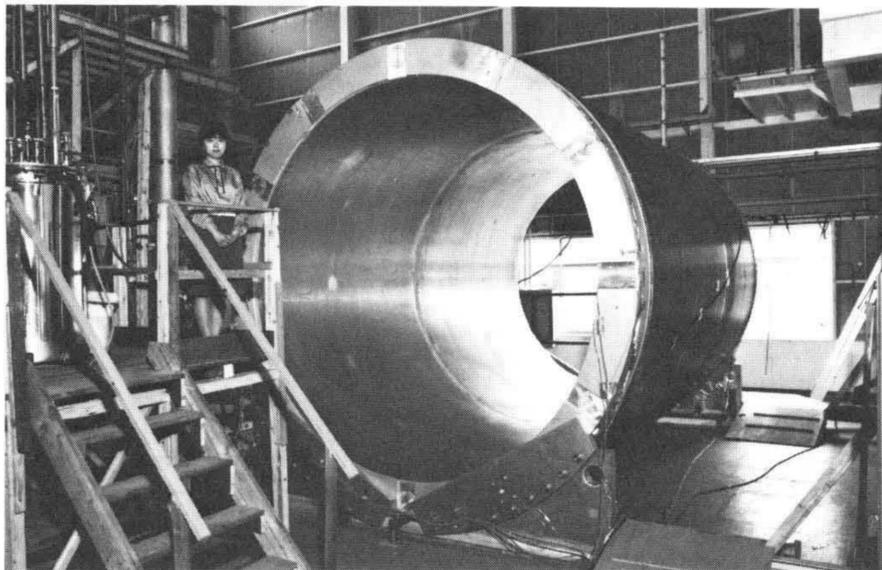


図2 CDFソレノイド外観 本体はアルミニウムで、チムニー及びコントロールデュワーはステンレスで製作されている。

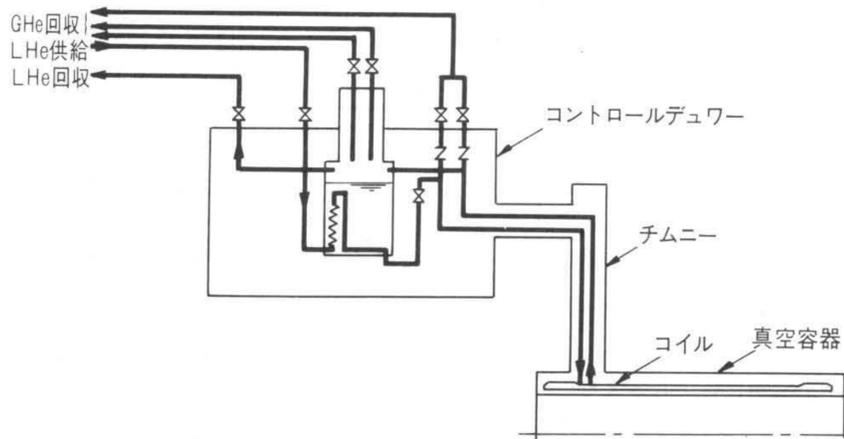


図3 全体系統図 CDFソレノイドは、電気と冷媒の導入部となるチムニーとコントロールデュワーをもつ間接冷却コイルである。

外観を図2に、また全体系統図を図3に示す。

前述の小輻射長の要求を達成するため、全体はアルミニウムを主体として構成されており、特にコイルは、アルミ安定化超電導体を用いた間接冷却方式で、かつコイルの内側に支持棒のない構造とするなど、各種の顕著な特徴をもっている。

3 CDFソレノイドの製作

以下、主要構成要素について設計製作の内容を説明する。

3.1 コイル

図4にコイルの外観を、また表2にコイルの主要パラメータを示す。コイルは直径約3m、軸長約5mの単層ソレノイドで、励磁時の電磁力に抗するため、外周からアルミニウム製シリンダ(以下、サポートシリンダと称する。)を焼ばめて支持する構造とするほか、下記の特徴をもっている。

(1) アルミ安定化超電導体の使用

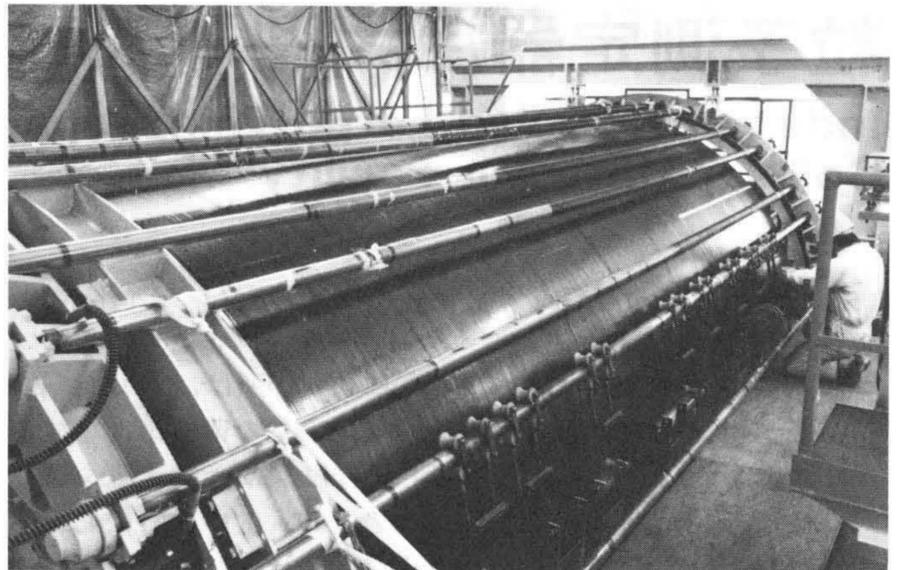


図4 コイル外観 巻線完了後のコイル全体外観を示す。巻線張力と単位長さごとの軸方向圧縮により、高精度かつ均一に巻線されたコイルである。

表2 コイル主要諸元 直径約3m、軸長約5mの大型コイルである。

項目	数値	
形状	単層ソレノイド	
内径	2,966mm	
軸長(巻線部)	4,793mm	
巻数	1,164ターン	
電流	5,000A	
自己インダクタンス	2.4H	
電磁力	自己電磁力	軸方向97t(コイル中心)
	偏心による電磁力(変位 20mm)	軸方向 36t
		径方向 26t

表3 超電導体の主要諸元 純度の高いアルミニウムを安定化材として、EFT法で製作された導体である。

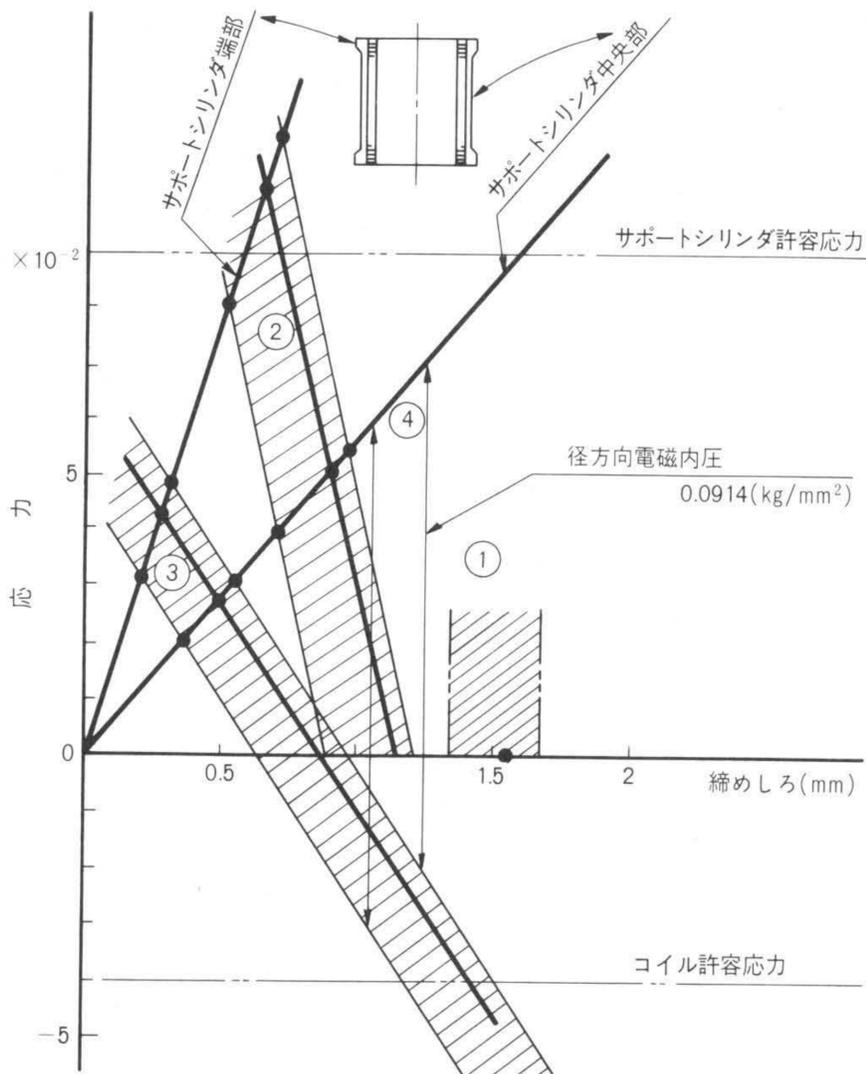
項目	数値
構成・寸法	
フィラメント径	$\phi 50\mu\text{m}$
フィラメント数	1,700
Al/Cu/NbTi	21:1:1
Al純度	99.999%
臨界電流	10,350A(1.5T, 4.2K)

(2) 間接冷却方式の採用

(3) コイル内側に支持棒のない構造

超電導体の安定化材に高純度アルミニウムを用いることにより、コイルの熱的安定性を高め、かつ輻射長を小さくするという目的を達成している。またこの超電導体の製作には、EFT(Extrusion with Front Tension)法という日立製作所及び日立電線株式会社独自の技術が開発・適用されており、超電導線と安定化材との間の熱的・電気的界面抵抗を小さくすることで性能向上が図られている。超電導体の主要諸元を表3に示す。

コイルは、外周側のサポートシリンダに設けられた冷却管を流れる液体ヘリウムにより間接的に冷却される。この場合、コイルと冷却管の温度差は最大0.3K程度で、問題とはならない。この方式を採用することで、従来通常用いられる浸せき冷却型に比べ下記の特長をもったものとなっている。



注：①〔初期設定値(計算値)〕、②〔巻線完了後(実測値)〕、
③〔巻枠解体後(実測値)〕、④〔励磁時(計算値)〕

図5 焼ばめ線図 製作過程、運転過程すべてを通じて、コイル及びシリンダは許容応力内となるように設計・製作されている。

- (1) 構造が簡単で、かつ輻射長が小さくできる。
- (2) 液体ヘリウムの内蔵量を少なくでき、異常時の安全度はより高いものとなる。

また、コイルは、内側の支持枠のない構造となっているが、これにより、輻射長を飛躍的に減少することができた。

以上のように、「輻射長最小化」という基本仕様を満足するための基本方針に加えて、電気的・機械的・熱的な見地から細心の考慮を払った設計としている。すなわち、電気的絶縁を取りながら、冷却のために熱伝導を極力良くするためのポリミド薄膜絶縁構造、軸方向残留圧縮力により機械的安定性と熱的接触の向上を図ったコイル構造などである。特に後者は、その製法に密接に関連しているが、コイルの軸方向に電磁力相当の機械的残留圧縮力を、径方向にも運転過程を考慮しての適度な圧縮力が残っているように製作されている。この径方向残留圧縮力は、いわゆる焼ばめにより得られるが、この場合、巻線後のコイル外表面にFRP(ガラス繊維強化プラスチック)層を形成し、これを機械加工してサポートシリンダの内面の接触性を良くする工夫を施している。また、焼ばめ後のアフターキュアにより、コイルとサポートシリンダ間を接着させ熱的な接触を向上させる工夫もなされている。図5はいわゆる焼ばめ線図で、各運転過程で発生する各種応力は許容内にあることを示している。

CDFソレノイドの磁場分布を有限要素法で計算した例を図6に示す。中心磁場1.5Tで、広い範囲にわたって均一な磁場空間を形成することが確認されている。コイルの負荷特性を図7に示す。5,000A通電、コイル電流密度64.3A/mm²時で負荷率65%であり、安定に運転できることが分かる。更に、この状態で常電導転移によるコイルの超電導破壊現象、いわ

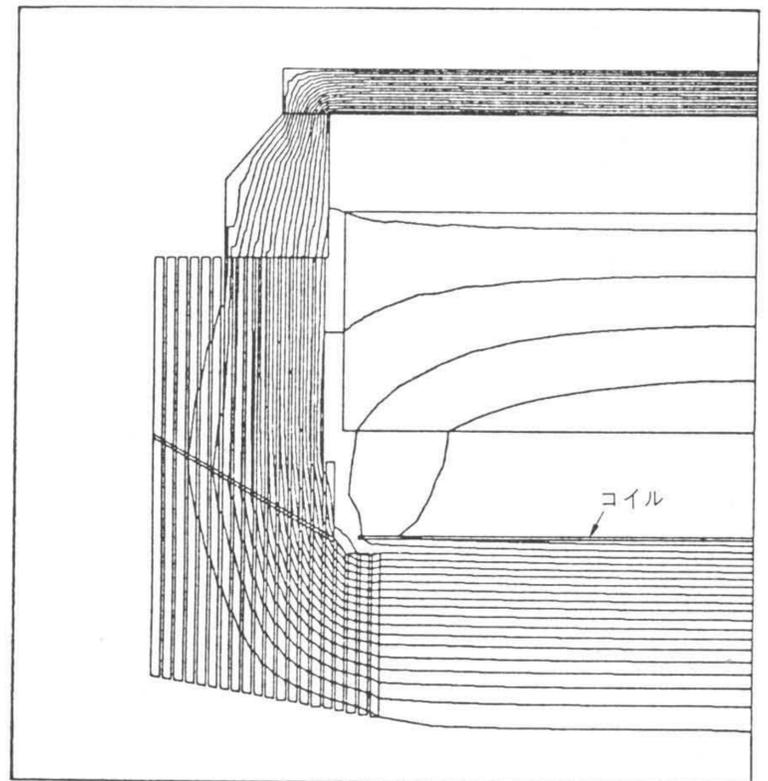


図6 磁場分布 5,000A励磁時の磁束分布を示す。

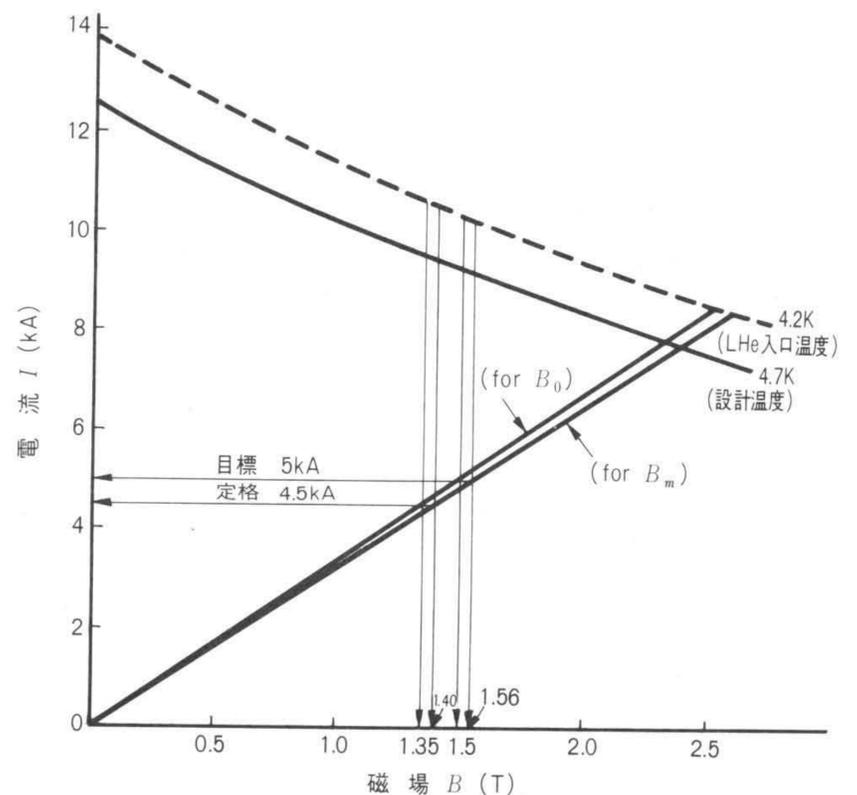


図7 負荷特性 コイルは、最大磁場で65%の負荷率で設計されている。

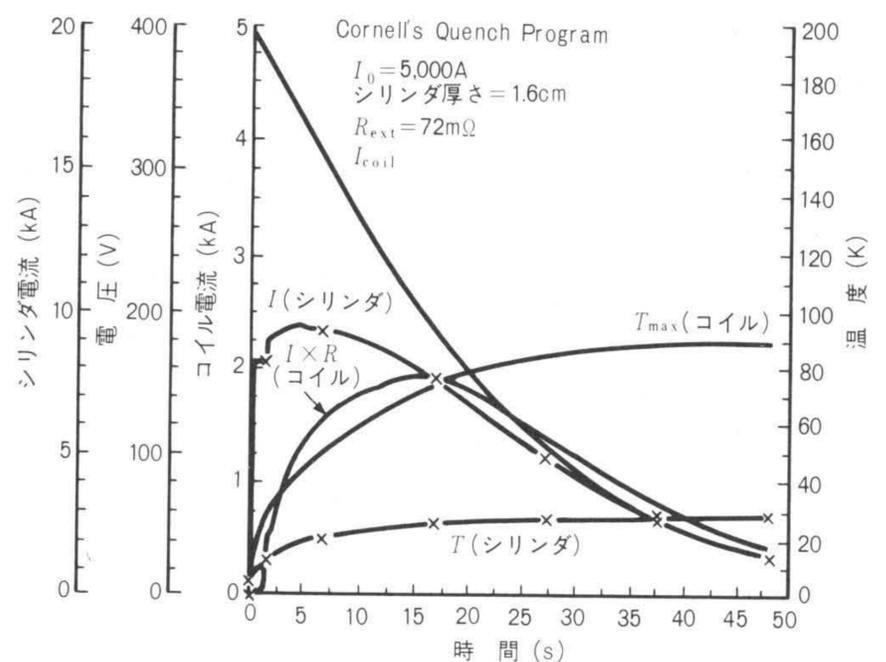


図8 クエンチ特性 クエンチが起こった場合のコイル及びシリンダの過渡特性を示す。コイルの最大到達温度は90K、最大発生電圧は150Vで安全な設計となっていることが分かる。

ゆるクエンチが起こったときの状況を解析した結果を図8に示す。コイルの最大到達温度は90K, 最大発生電圧は150Vで, この場合もコイルは安全である。この結果から, いわゆるクエンチバックの現象が観察され, コイルの安全性を促進させる働きをしていることが分かる。すなわち, コイルの消磁に伴い, サポートシリンダ側に二次電流が流れ, サポートシリンダの温度が上がり, これによってコイルを温めるため, 常電導伝搬速度を速め, 局所的な温度上昇の発生, 絶縁破壊の発生を防いでいる。この現象は, 約2秒後に起こり始めることが図8から観察される。

次にコイルの製作法について述べる。コイルは, 解体可能な巻型に100kgの張力で巻き, 単位巻数ごとに1 kg/mm²の軸方向圧縮力をかけ135°Cで焼付けして製作した。コイル巻線完了後, コイル外周にFRP層を形成し, 機械加工することで, 焼ばめ時のコイルとサポートシリンダの密着性を良くした。熱伝導特性を向上させるため, FRP層は可及的に薄くして2.5mmの厚さとした。また同じく熱伝導特性を向上させるために, FRP層上にエポキシの接着剤を塗布しており, コイルとサポートシリンダは接着されている。長尺コイルのため, 不均一な焼ばめとならないよう, ヒータを用いて温度コントロールが可能なものとし, サポートシリンダ挿入後の温度下降の際は部分的に温度こう配を付けていく工夫を凝らすなど, 万全を期した。

径方向の初期焼ばめ締めしろは1.5mmであった。サポートシリンダ挿入後, コイルはサポートシリンダからボルトで電磁力相当の軸方向圧縮力で押した構造とした。この後, サポートシリンダとコイルとはアフターキュアで接着が成され, 最後に巻型を解体することで, 内側に支持枠のないコイルが完成した。

コイルの接続には, 2本の導体を適切な接続長さで溶接する方法を採用し, 非常に低い接続抵抗となるように配慮した。

3.2 クライオスタット

クライオスタットは真空容器, 輻射シールド, コイルサポートなどから構成される。コイルを内蔵し支持した状態のクライオスタット断面を図9に示す。

真空容器は, すべてアルミニウム合金で作られており, かつ設計上許容できる最小の厚さで製作されている。真空容器は端部をヨークに固定された構造となるが, 応力及び変形とも特に問題とならない。図10に変形解析図を示す。

輻射シールドもまたアルミニウムで作られており, 冷却時の熱応力発生を避けるため, 冷却とともに軸方向にスライド可能な構造となっている。

コイルは径方向に片側12本, 両側で計24本の径方向サポート, 軸方向には片側6本のサポートで支えられる構造となっている。コイルサポートは, 支持部は回転自由で, 径方向熱収縮及び軸方向熱収縮に対しては熱応力を受けない構造としている。

励磁時は, ヨークとコイルとの軸方向及び径方向偏心により, 軸方向最大36t, 径方向最大26tの電磁力が働くため, これを支えかつ熱侵入を小さくする設計として, インコネル718を用い, 途中に液体窒素によるサーマルアンカをとった構造とした。軸方向サポートは外径φ26mm, 内径φ20mmのパイプとし, また径方向サポートはφ15mmのロッドとした。

ヨークとコイルとの配置については, 電磁力を可及的に小さくするよう最適化されているが, このためにはコイル端と真空容器間の寸法を最小化することが必要で, このコンパクト化を考慮した工夫を施した。

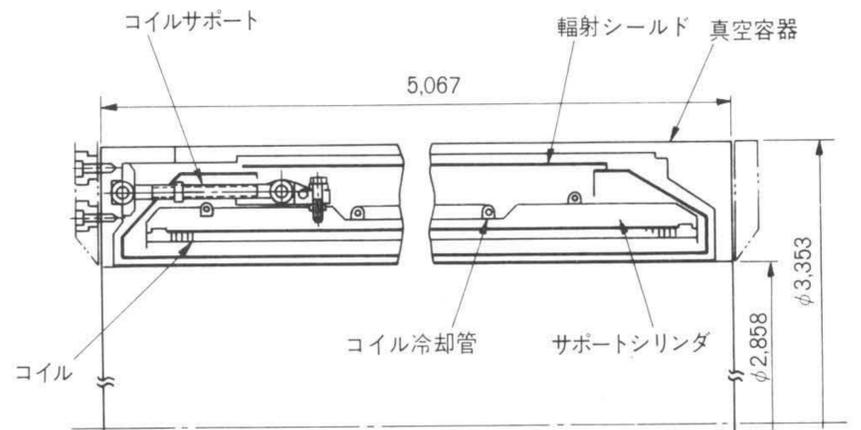
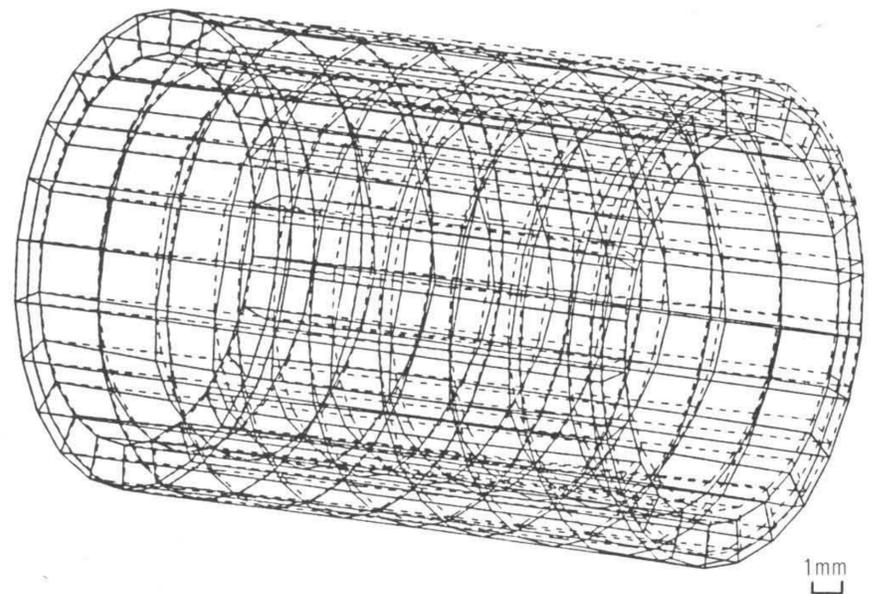


図9 クライオスタット断面図 コイルは冷却管の取り付けられたサポートシリンダで拘束された状態で, コイルサポートにより真空容器に固定・支持された構造となっている。



注: ----- 変形前, ———— 変形後
図10 真空容器変形解析図 片端と固定支持したときの変位分布を示す。

クライオスタット内には計測素子が随所に設けられている。温度計として, カーボン抵抗温度計, プラチナ抵抗温度計が, コイル, 輻射シールド, コイルサポートに, また応力・変位測定素子が, 各コイルサポートすべてに設けられている。コイルには, 電圧タップが設けられ, 冷却時の監視, クエンチ時などのコイルのふるまいなどを観察することができる。

3.3 コントロールデュワー及びチムニー

コントロールデュワーとチムニーは, コイル側への電気と冷媒の導入部となる。チムニーは, 周辺の検出装置を突き抜いて設置されるため, できるだけ小さくする必要があり, この点でも間接冷却方式は好適である。

コントロールデュワーに導かれた液体ヘリウムは, 液体ヘリウム槽内で熱交換され, 気液混合率の良くなった二相流液体ヘリウムとなり, チムニーを通過してコイル側へ供給されコイルを冷却した後, 再びチムニーを通過してコントロールデュワー側に戻る。

電流リードは絶縁物を介して接触し, かつ並行に走る冷却管と一体でコントロールデュワーとチムニー内を引き回される構造である。間接冷却コイルでは, 導体の局所的なホットスポットが性能上問題となるが, 特にこのチムニー内の電流リードはこの点で十分配慮しており, 導体を1本余分に溶接接続し, またバインド及びクランプで冷却管と密接に一体化させて, 電氣的・熱的な安定性を図っている。また, 電流リード, 輻射シールドの固定方法についても, 冷却時発生する熱応力を緩和するような構造となるよう配慮している。

また, チムニーと本体真空容器の接続部にも種々の工夫が施されている。チムニーの材質がSUSであるのに対し, 本体

真空容器はアルミ合金でできているため、この接続部にはSUS-アルミ継手を使った。また、分解・組立の容易性を考慮し、接続部付近の超電導導体については、化学処理によって表面に薄い銅層を形成させ、はんだで接続する方法を採用した。

コントロールデュワー内は、本体と同様、抵抗温度計、圧力計、真空計、液面計、電圧タップなどの計測素子が設けられており、運転時の監視を行なうことができる。また、クエンチ時などの圧力上昇に対する安全性を考慮して、各種系統には安全弁が設けられている。

4 特性試験

チムニー及びコントロールデュワー単体で超電導試験を実施し、コイルを除く系統について、冷却特性と励磁時の安定な運転(現地定格電流5,000Aを20%上回る6,000Aまで通電)を確認した後、本体コイル側と組み合わせたの全体特性試験を実施した。特性試験のフローチャートを図11に示す。特性試験は、日立製作所所有の冷凍機を用いての直結運転で冷却し、定格電流の58%の2,800Aまで励磁した。定格までの励磁は空心のため、軸方向圧縮自己電磁力が現地条件に比べ過大となるため、この励磁条件となった。以下、特性試験結果について記述する。

4.1 予冷

図12に実際に得られた予冷曲線を示す。コイルのサポートシリンダの中央部、輻射シールド及びコイルインターセプトの温度変化の様子を示している。予冷は、冷凍機から送られる約5g/sの液体ヘリウムによって、約2K/hの速度で冷却された。冷却に要した時間は300-100Kで5.5日、100-4Kで2日、合計7.5日で、ほぼ計算値と合致する結果が得られた。

また、この試験を通してコイルのアルミ安定化材の残留抵抗比は、1,885と計算され、予想どおりの結果が得られた。

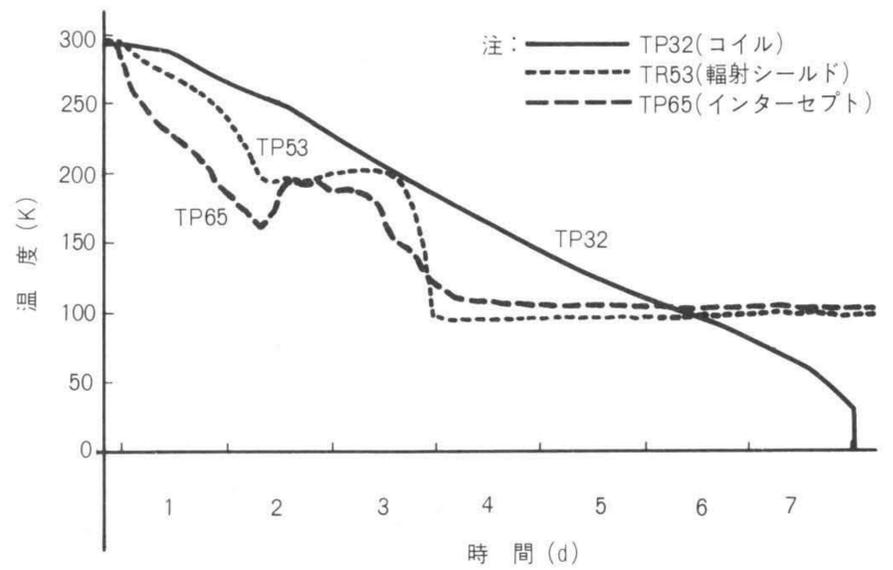


図12 予冷曲線 平均予冷速度2K/hで、ほぼ予想どおりの結果が得られた。

4.2 励磁試験

図13に励磁試験の試験スケジュールを示す。最大電流2,800Aの励磁で、コイルは安定に動作することが確認された。またこの状態で(蓄積エネルギー7.5MJ)、遮断しても全く安定であった。

更に、最大400A/minの励磁速度変化試験を実施したが、常電導転移現象は観察されず、またサポートシリンダの温度変化も元の温度への復帰が非常に早く、安定であった。

次に、ヒータによるクエンチ試験を励磁電流2,800Aで行なったが、約10kJ(3.4kJ×3パルス)のヒータ入力に対しても、常電導転移現象は観察されずコイルは非常に安定であった。

2,800A通電状態を10時間保持したが、コイルは全く安定で長時間運転に対する信頼性を確認することができた。

コイルの安定性・安全性は、冷凍機を停止した後のコイルの挙動を観察することで更に確認することができた。10A通電状態で冷凍機を停止したが、約1.5時間にわたってコイルは

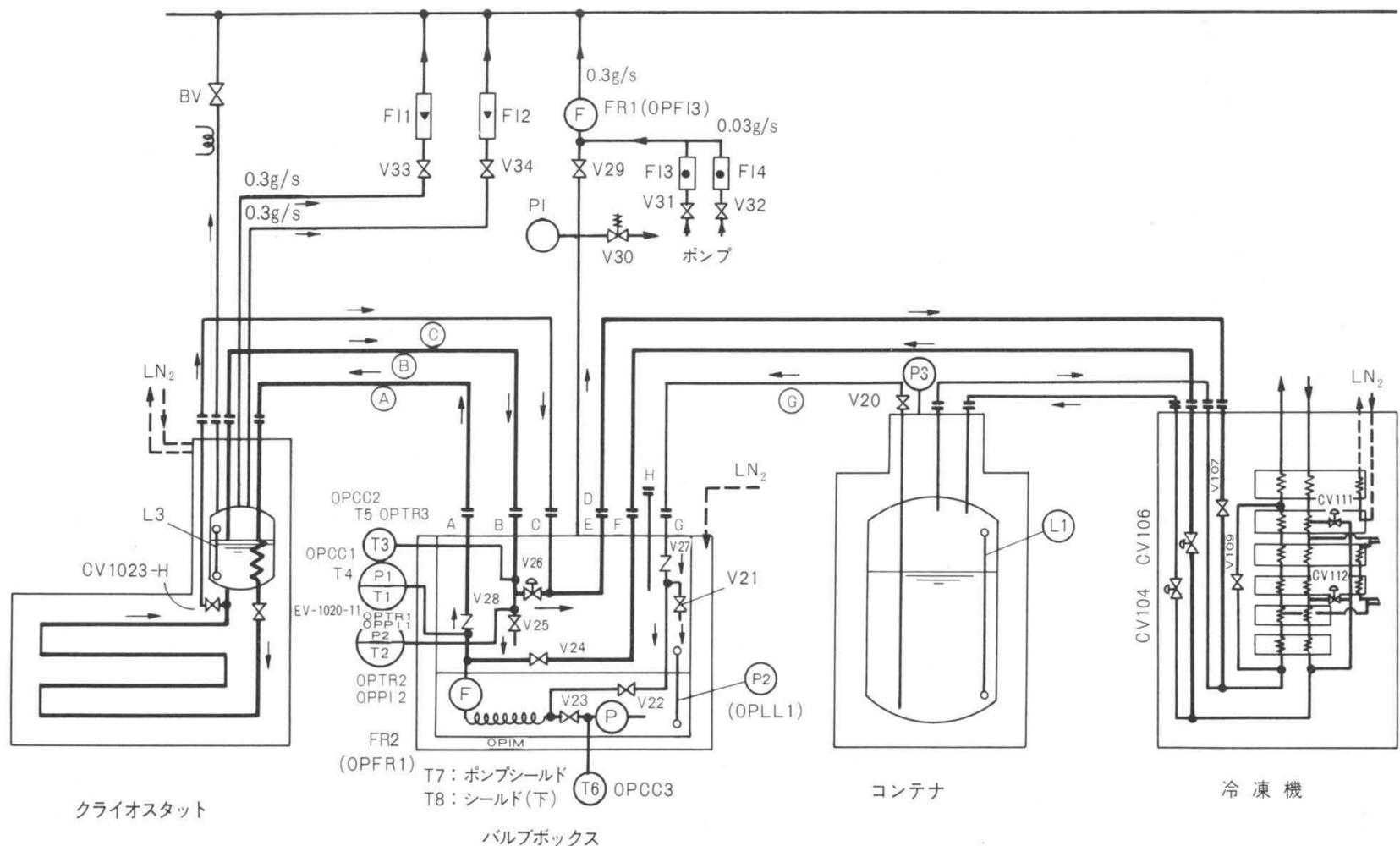


図11 特性試験フローチャート 冷凍機直結運転(A)を基本とするが、冷凍機の異常時などを考慮し、バックアップとして、ヘリウムポンプ運転(B)、液体ヘリウム加圧供給運転(C)も可能なシステムとしている。

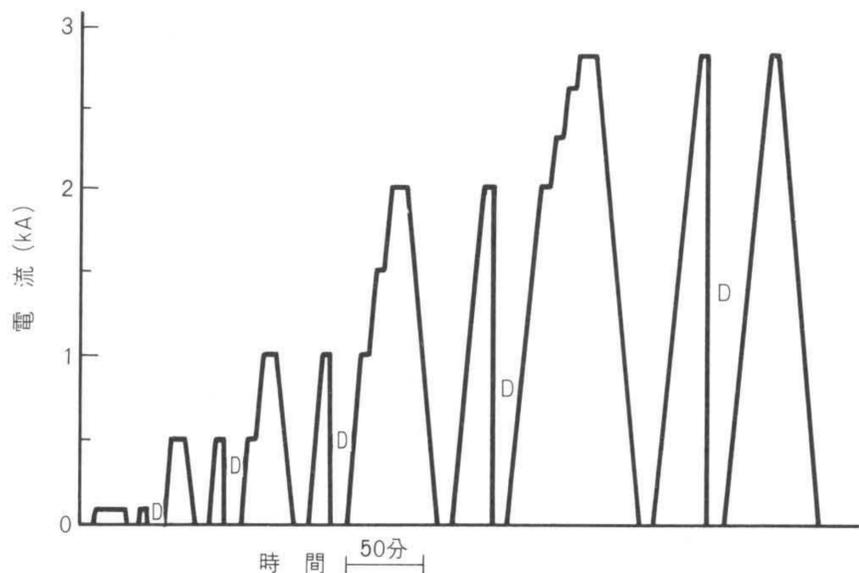


図13 励磁スケジュール 記号Dは遮断を示す。2,800Aまで励磁・遮断を繰り返す、コイルの健全性が確認された。

超電導状態を保ち続け、この後コイルは両端から徐々に常電導転移し始めた。この結果は、コイルに局所的なホットスポットがないこと、及び冷媒移送系に異常が起こった場合でも十分に対応できる時間があることを示しており、安定かつ安全なコイルであることを確認できた。

励磁試験中のコイル入口側冷媒条件は、液体ヘリウム流量17g/s、温度4.5K、圧力0.3kg/cm²であった。

4.3 熱負荷試験

非通電時の熱負荷を液体ヘリウムの加圧供給法により測定した。測定された全熱負荷よりトランスファチューブ、その他周辺機器の熱負荷を差し引いて求められたCDFソレノイドの熱負荷は約35Wで、設計値を下回る良好な結果が得られた。

以上の結果を通しCDFソレノイドの特性を確認し、ほぼ設計計算どおりの結果となっていることが判明した。

5 結 言

粒子測定用CDFソレノイドは、既に現地での据付が進み、順調に運転準備が進められている。本装置を用いての素粒子実験の成果が数多く得られることが期待されており、関係者の注目を集めるところとなっている。CDFソレノイドは、機械的に安定でかつ内側に支持棒のない構造の確立といった点をはじめとして、多くの新技術の開発を必要とし、設計・製作は困難を極めたが、当初の目標を達成することができた。この成果は、今後建設される同種装置に対応できる技術を確認したと考えられるが、この経験をもとに、更に努力を続けてゆく考えである。

終わりに、本装置の設計・製作に当たり、御指導と御協力をいただいた文部省高エネルギー物理学研究所及びフェルミ国立加速器研究所の関係各位に対し、深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) H. Hirabayashi, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 2243(1981)
- 2) H. Hirabayashi, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. **21**, 1149(1982)
- 3) R. Fast, et al. : Fermilab Design Report(1982)
- 4) T. Kishimoto, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. **22**, 57(1983), and S. Mori, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. **22**, 812(1983)
- 5) R. Yamada : CDF Solenoid Eng. Note **39**(1982)
- 6) H. Minemura, et al. : Nucl. Inst&Meth. **219**, 472(1984)
- 7) H. Minemura, et al. : Journal de Physique, Proc. 8th Magnet Technology CT-333(1984)
- 8) S. Suzuki, et al. : Hitachi Cable Review No.2, 37(1983)

論文抄録

自律分散システムとその応用

日立製作所 井原廣一・大島弘安

電気学会雑誌 104-3, 169~176 (昭59-3)

現代分子生物学では、生命現象の基本的枠組みはDNA塩基配列によるデジタルコードの形で表現されているという。

生体生成及び生体維持の情報が、遺伝情報として細胞内に複製されて世代交代を続ける様相は、細胞に相当するコンピュータシステムでのプログラムのそれに似ており、これらがマイクロコンピュータに收容されている様は、まさに細胞のDNAそのものと考えられる。情報の伝達は、神経系とホルモン分泌系によって行なわれる。ニューロンが伝送制御装置であり、シナプスが光伝送路である。ホルモンは特定の細胞から生成され、伝送形態はブロードキャスト方式である。

システムとしての性能が最大限に発揮できるシステムアーキテクチャとして基本的に集中をとっているが、システムが大規模化してくると、信頼性をいかにして高めるかとともに、システムの段階的建設や稼働中の保守をいかにできるようにするかが、

本質的なニーズである。

分散システムを、

- (1) サブシステムの機能と目的を第一義にとらえ、その統合されたもの。
- (2) システムはライフサイクルプロセスをもつもの。としてとらえる。

自律分散システムは、自律可制御性、自律可協調性の性質をもつ。すなわち、各サブシステムは全体についての構造を知らなくても、自らの判断で自分の責任領域の制御を実行し、その変更や修正に対しても自らの責任で対応する。また、いかなるサブシステムもほかとの協調をとるために、ほかのシステムの判定に頼らず情報交換の手段、及び状況に応じた各自の協調決定ルールをもつことが必要である。

以上の定義から自律分散システムの情報系は、次の性質をもたねばならない。

- (1) システム内の情報はすべて平等に取り扱われ、優先順位はもたない。

- (2) 情報はすべて発生時点で近接するサブシステムへ順次伝えられる。各サブシステムは、伝送された情報のうちから必要とする情報を取り入れる。

- (3) 内外の異常は、サブシステム周辺及び自己の情報により検知を行ない、異常がほかへ波及することを防ぎ、ほかからの障害に対して自らを防衛する。

生物の神経系に相当する自律分散伝送システムは、以上の考察に従って内容コード通信、スルー通信、同時通信、優先処理は不必要、の特徴をもつ。

また、頭脳や器管に相当する自律分散複合システムは、細胞に相当する均質な構造と自律性をもったマイクロプロセッサの集合体として構成され、上述の伝送システムと同様な特徴をもつ。

適用例として、神戸市交通局(地下鉄)の運行管理システム、帝都高速度交通営団(丸の内線)の自動旅客案内装置について紹介した。