

3.6.5 計測機器整備計画案

大型ヘリカル装置の計測計画では、計画の当初より LHD 実験計画の後半において重水素実験を実施するに当たって、計測システムの大幅な変更なく対応できるように配慮してきた。しかし、重水素実験の開始に当たって必要となる計測機器については、実験開始時から整備することは無駄な投資となること、実際の重水素実験時に必要となる計測装置がより明確となること、又、新しく高性能な計測装置が開発されることが予想されること、等を考慮して整備されなかった。今回、LHD の重水素実験計画を進めるに当たり、表 3.6.5- 1 に示す計測装置を新たに整備する計画である。各々の計測システムについては次頁以降に詳細に説明する。

表 3.6.5-1 LHD 重水素実験において必要な計測装置とその概要

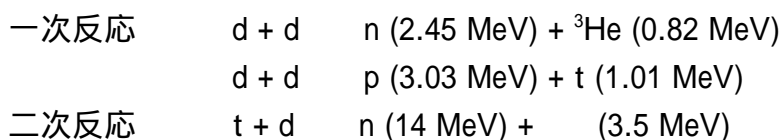
計測装置名	計測システムの概要
3.6.5.1 中性子計測システム	重水素プラズマ実験で発生する中性子を計測し、その発生分布を詳細に計測する。
3.6.5.2 高エネルギー粒子計測システム	重水素実験時に発生する高エネルギー粒子の発生場所とエネルギー分布を計測することにより、高エネルギー粒子の閉じ込め物理の解明を行う。
3.6.5.3 高精度輸送計測システム	高温プラズマの研究では、熱及び粒子の輸送が重要な計測課題となっている。特に、重水素実験では、高エネルギー粒子の挙動及びその影響を捕らえる事が重要であり、そのための 3 次元トモグラフィ計測システムを整備する。
3.6.5.4 ダイバータ計測システム	プラズマ中心部の高温プラズマの保持の為に、周辺部における熱、粒子の制御が重要である。このために周辺プラズマパラメータ計測装置を整備する。
3.6.5.5 定常・高速データ収集処理システム	重水素実験では実施可能な実験回数に制限があるため、より密度の高いデータ収集を行う必要がある。このため、定常実時間での運用および揺動計測に代表される空間的にも時間的にも大容量となるデータの高速収集を行う。

3.6.5.1 中性子計測システム

1) はじめに

重水素プラズマでは温度やエネルギーに応じた確率で重水素同士による核融合反応が起き、それに伴い中性子が放出される。重水素プラズマ中で起きる核融合反応に

ついて以下に記す。



重水素プラズマにおける中性子発生率は、プラズマの巨視的な性能を表す。大型ヘリカル装置（LHD）における重水素放電では、大型トカマク装置 JET や JT-60U における重水素実験時の中性子発生率と同等の 1 秒当たり 10^{16} 個程度の中性子発生率が予想されている。

重水素中性粒子ビーム入射加熱実験において、中性子は、1) 熱核融合反応（バルクイオン・バルクイオン）、2) ビーム成分・バルクイオン反応、3) ビーム成分・ビーム成分反応の 3 つの過程で発生する。通常、過程 2、所謂 TCT (two-energy-component torus) 反応により発生する中性子が支配的である。別の角度から見れば、発生する中性子は、中性粒子ビーム入射によりプラズマ中に生成される高エネルギーイオンの閉じ込めの情報を有していると言える。

以上述べたことを背景にして、LHD における重水素プラズマ実験時に必要な中性子計測システムをその目的毎に表 3.6.5-2 に示す。各々の詳細については、次の 2 . 実施計画の中に記す。

なお、発生中性子の絶対量はトリチウム発生量にほぼ等しく、精度よく中性子発生量を計測することは、トリチウム発生量の正確な把握、並びに放射線管理上の点でも必須である。

表 3.6.5-2 LHD 重水素実験において必要な中性子計測機器

測定対象	得られる物理情報	中性子検出器・計測手法
総中性子発生率・量	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合出力、核融合利得 ・巨視的な高速イオンの閉じ込め ・イオン温度 (イオンの速度分布にテイル成分が無い場合) 	<ul style="list-style-type: none"> ・核分裂計数管 ・比例計数管 ・放射化箔 (イオン温度を除く)
プロファイル	<ul style="list-style-type: none"> ・中性粒子ビームの加熱分布 ・高速イオンの径方向輸送 ・シャフラノフシフト 	<ul style="list-style-type: none"> ・スチルベン有機結晶 シンチレータ
エネルギー スペクトル	<ul style="list-style-type: none"> ・イオン温度 (イオンの速度分布にテイル成分が無い場合) ・高速イオンの速度分布 (イオンの速度分布にテイル成分が有る場合) 	<ul style="list-style-type: none"> ・${}^3\text{He}$ 電離箱 ・飛行時間型スペクトロメータ
14MeV 中性子発生率	<ul style="list-style-type: none"> ・MeV イオンの閉じ込め特性 	<ul style="list-style-type: none"> ・シンチレーションファイバを利用

2) 実施計画

2) - 1 総中性子発生率並びに発生量計測システム構成

2) - 1 . 1 システム概要

重水素プラズマでは、中性子の発生に加えてガンマ線の放出を伴う。総中性子発生率を精度良く測定するために、中性子とガンマ線の弁別が容易、且つ長期間にわたって安定動作が望める計測システムを構築する必要がある。また、放電シナリオにより中性子発生率は、ビームイオンの減速時間程度のタイムスケールで 10^6 個/秒程度の変化が予測される。よって計測には、計数率に広いダイナミックレンジを有するシステムが必要となる。LHD では、上記の条件を満たし、大型トカマクにおける重水素プラズマ実験の標準検出器と言ってよい ^{235}U 核分裂計数管 (電離箱) を標準検出器として採用する。 ^{235}U 核分裂計数管は、熱中性子に対して感度を持つ。D-D 反応により発生した中性子 (2.45 MeV) が十分に減速する厚さ (約 5 cm) のポリエチレンで計数管を覆い、LHD 装置本体周辺の対称性の良い位置に固定設置する。 ^{235}U の核分裂によって出力される計測信号は極めて大きいので、バックグラウンドとなるガンマ線の影響をほとんど受けず、正確な中性子計数を得ることができる。広いダイナミックレンジを確保する目的で、回路にはパルス計数回路と電流モードの一種であるキャンベルモード回路が連動する形のシステムを装備する。キャンベルモードは 10^4 - 10^{10} cps という広い計数率範囲で動作し、パルス計数モードとあわせると更に広いダイナミックレンジを得ることが出来る。このシステムには、約 1 ms の時間分解能が期待できる。また、高速中性子 (約 1 MeV 以上) のみに感度を持つ ^{238}U 核分裂計数管を併せて使用する。 ^{238}U 核分裂計数管は ^{235}U 核分裂計数管に比して感度が低い。今後の LHD 研究の進展により、LHD プラズマが従来よりも更に高いイオン温度を達成した際に得られる高い中性子発生率に対応することが主たる目的である。加えて、電子サイクロトロン加熱 (ECH) プラズマ等の中性子発生率のごく低い放電を想定し、 ^{235}U 核分裂計数管に比して中性子感度が数桁高い ^3He 比例計数管 (パルス計数モード) も併せて採用する。 ^3He 比例計数管も ^{235}U 核分裂計数管同様、熱中性子に感度が有るため、ポリエチレンで覆った形で使用する。 ^3He 比例計数管と ^{235}U 核分裂計数管のパルス計数モードの間、 ^{235}U 核分裂計数管のパルス計数モードとキャンベルモードの間には、重複領域があるので相互較正を行えるという点で大変都合がよい。LHD の重水素プラズマ実験では、これらの感度の異なる 3 種類の計数管を 1 組みとして計 3 セット用意し、このシステムを標準型中性子束モニターとする。

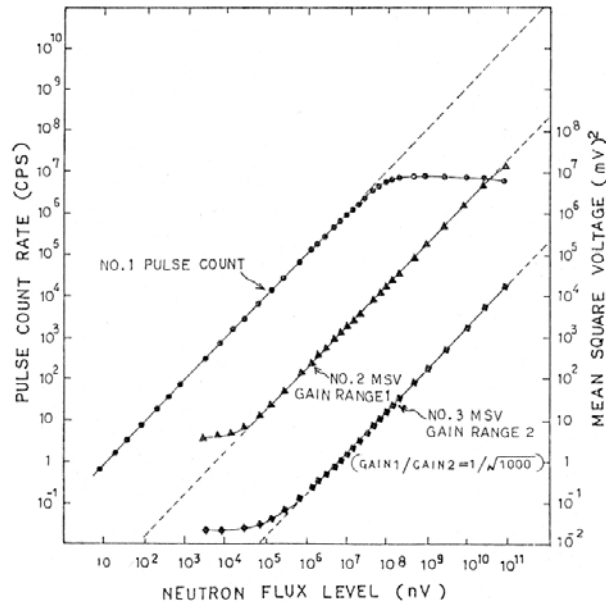


図 3.6.5-1 核分裂計数管出力のパルス計数モードとキャンベルモードの比較。パルス計数モードの場合、中性子束が増えてくると出力パルスが重なり合い直線性が失われる。(参考文献 1 より引用)

上記に加えて、総中性子発生量決定のための補助的な方法として、 ^{115}In などを利用した放射化箔システムを導入する。この場合、測定される中性子束は放電中の積算値であるので、中性子発生率の時間変化が分からないという欠点があるが、ガンマ線に対して不感であり、放射化箔を設置した位置での中性子の絶対量測定が可能であることから、核分裂計数管出力のクロスチェックに極めて有効である。放射化箔は、計測のダイナミックレンジが広いこと、つまり、中性子束が非常に大きい場合であっても、実際の中性子束と測定結果の間の直線性が広い範囲で確保できるという利点もある。また、中性子エネルギー閾値が D-D 中性子エネルギーよりも高い金属箔を選択することにより、トリチウムの反応により二次的に発生する 14 MeV 中性子のみを検出することができ、トリチウムの反応率の絶対測定も可能となる。放射化箔は、LHD 計測機器室から LHD 本体室の標準型中性子束モニタ近傍に気送管にて送られる。放電終了後、次の放電までの間に、中性子束を受けた金属箔は再び気送管にて計測機器室に送り返され、そこで箔より放出されるガンマ線束を Ge 半導体検出器により測定する。この手続きは全て、自動化を図るものとする。これにより、放射化箔位置での中性子の絶対束が評価される。

以上に述べた中性子計数管と放射化箔システムを組み合わせることにより、信頼性の高い中性子束モニターを構築する。

2) - 1 . 2 絶対較正実験

重水素プラズマにおける中性子発生量を得るためには、LHD の真空容器近傍に設置した中性子検出器の出力とトーラス全体の総中性子発生量との関係を予め較正して

おく必要がある。中性子発生率 S_n と検出器の計数率 C_{rate} の関係は次のように書ける。

$$S_n \text{ (n/s)} = \alpha \times C_{rate} \text{ (cps)}$$

ここで言う較正実験とは、係数 α を求める作業を指す。中性子源となるプラズマがトーラス状であること、またプラズマと計数管の間には、真空容器、磁場生成コイル、超伝導コイル冷却用の液体ヘリウム、冷却水配管、加熱・計測機器、並びに周辺構造物等が存在し、これらは中性子の散乱・減速材として働くため、両者の間の関係は単純には決まらない。よって、中性子検出器の絶対較正のために、中性子発生率が既知で、且つ重水素プラズマから放出される D-D 中性子のエネルギー (2.45 MeV) に近いエネルギーの中性子を放出する中性子源を予め準備しておく必要がある。較正実験では、トーラス状の中性子源を模擬するために真空容器中心にて容器内を周回させるシステムが必要である。そのために、容器中心にレールを敷設し、そのレール上を中性子源が遠隔操作にて容器中心に沿って移動できるシステムを整備する。TFTR、JT-60U などの大型トカマク装置ではこの手法により較正が行われている。図 3.6.5-2 に、LHD 真空容器内におけるレールシステムの概念図を示す。この較正作業は、中性子発生量を正確に把握する上で欠かせない。参考までに、以前に小型のヘリカル装置 CHS (名古屋大学内東山サイト時代) において、BF₃ 比例計数管 (トーラス中心設置)、³He 比例計数管 (大半径方向外側設置) の較正を行った際の様子、並びに得られた較正データについて図 3.6.5-3 に示す。この時、真空容器中心に沿ってプラスチック管を設置し、その中をタコ糸に結ばれた自発核分裂中性子源 ²⁵²Cf を入れ、糸を引っ張ることにより線源を移動させるという方式であった。ただし、LHD で使用する線源強度 (CHS よりも約 3 桁強い線源が必要) や位置精度等の問題から、この方法は LHD には適さない。

磁場閉じ込め核融合装置における中性子計数管の較正方法を標準化することを目的に、1989年に米国・プリンストンで中性子計測の専門家が集まり、中性子計測較正ワークショップが開かれた。この時、1) ²⁵²Cf を真空容器内で回した後に中性子輸送シミュレーション計算で補正する方法、2) 放射化箔を用いてガンマ線測定を行う方法、が推奨されることとなった。LHD では、この2項目に従った形での較正実験を行うことに加えて、D-D 中性子を発生する小型加速器を利用した中性子発生器を用いた較正も行う。その理由については以下に述べる。²⁵²Cf から放出される中性子の平均エネルギー (2.14 MeV) は、D-D 中性子のそれ (2.45 MeV) に近い値であるが、核分裂に伴い放射される中性子であるが故に、そのエネルギーに大きな広がりを持つ。このことが較正係数に誤差を与える可能性がある。エネルギー分布の違いが較正係数に与える影響を調べるために、MCNP コード等による中性子輸送シミュレーションを行うことはこの問題に対する一つの対処法である。しかしながら計数管周辺にある構造物全てを計算に取り込むのは困難で、また計算に使用する核断面積データの精度の議論もあり、実際には ²⁵²Cf のエネルギー分布を考慮した計算をしても、通常計算値と実測値は精度よく一致しない。較正に、重水素ターゲットに高速重水素ビームを衝突させる小型中性子発生加速管を用いれば、中性子のエネルギー分布の違いから来る影響を取り除くことが出来る。ただしこの場合には、ターゲットから放出される中性

子の発生空間分布が等方的でないという問題を併せ持つ。これらの較正に関わる問題に対して、LHD では出来るだけ高い精度で実験的に較正值が得られるよう2種類の中性子源、 ^{252}Cf と D-D 中性子発生小型加速管を用いて中性子計数管の較正を行う。核融合装置における中性子計測においては先駆的存在と言って良い米国・プリンストン大学プラズマ物理学研究所の TFTR トカマクでは、実際に2つの中性子源で得られた結果を基に較正係数の値が決定されている。真空容器内に設置したレールや加速管自身の存在による中性子の散乱の影響については、中性子輸送シミュレーションにより調べ、必要があれば実験で得た較正係数に補正を加えることとする。中性子計数管較正に必要な中性子源について、表 3.6.5-2 に纏める。

小型加速管を利用した D-D 中性子源は、LHD の中性子束モニターの絶対較正に使用するのみならず、これ以降に述べる中性子計測系の開発を進めるにあたり必要不可欠である。そして、同時にこの中性子発生器を動作させ、中性子計測開発を行うためのテストエリアの確保も必要となることを付記する。

表 3.6.5-2 LHD 中性子計数管の較正に使用する中性子源

	中性子発生率	a)平均エネルギー b)エネルギー分布	空間発生分布
自発核分裂中性子源 ^{252}Cf	約 1×10^8 (n/s)	a) 約 2.14 MeV b) ブロード(< 10 MeV)	等方
D-D 中性子発生加速管	約 1×10^8 (n/s)	a) 約 2.45 MeV b) ほぼ単一	非等方

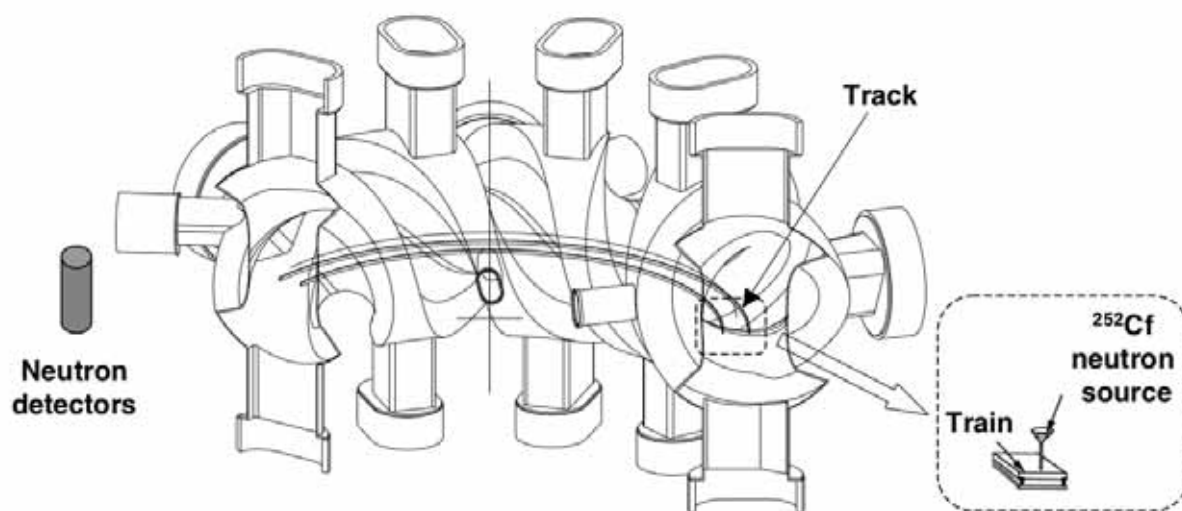


図 3.6.5-2 LHD における中性子束モニターの絶対較正実験の概要図。真空容器内にレールを敷設し、その上を ^{252}Cf 中性子源（もしくは小型中性子発生加速管）を搭載したトロッコを周回させる。

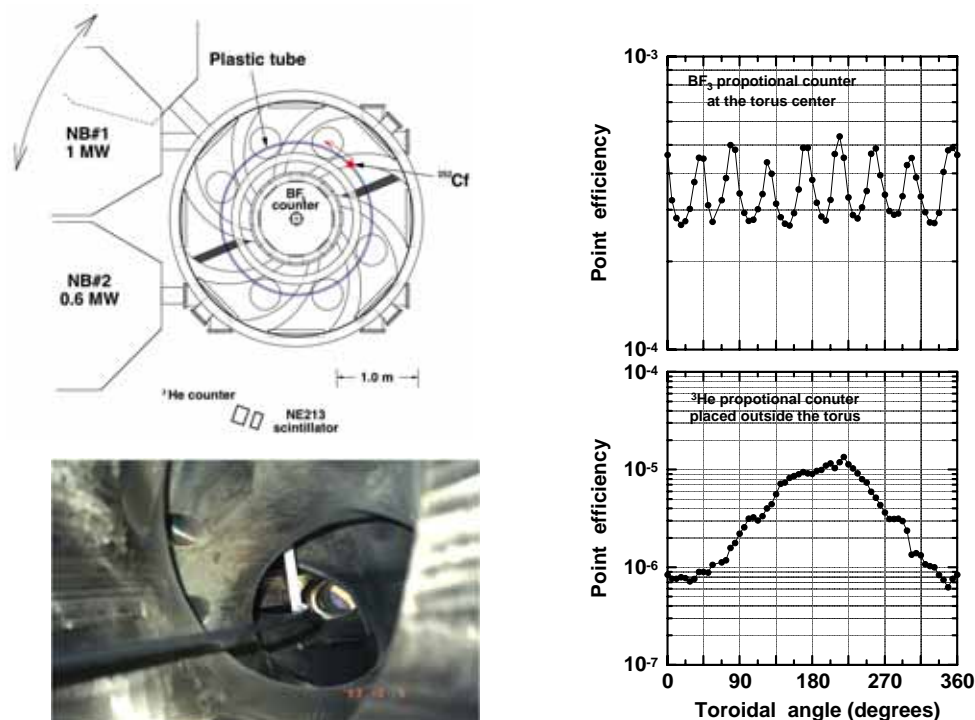


図 3.6.5-3 CHS で行われた中性子計数管較正実験の様子（左図）及びトーラス中心に設置された BF_3 比例計数管と大半径方向外側に設置された ^3He 比例計数管の効率曲線（右図）（詳細は、参考文献 3 を参照）。

2) - 2 中性子プロファイル測定

2) - 2 . 1 マルチチャンネルコリメータ

プラズマから放出される中性子のプロファイル計測を行う際、プラズマを見込むように検出器を並べるのみでは正しい計測にはならない。なぜならば、真空容器、周辺構造物、床や壁で散乱された中性子が様々な角度から検出器に飛び込み信号を作るためである。プラズマから検出器に真っ直ぐに飛来する中性子のみを検出するためには、散乱中性子が検出器に届かないよう、遮蔽、吸収材を上手く組み合わせたコリメータを使用する必要がある。LHD では実験開始当初より、将来の重水素実験における中性子プロファイル測定を想定して、縦長断面下側の計測ポート（4.5L）に大半径方向内側から外側に向けて小ポート（ICF70）列が設けてある。プロファイル測定には、これを利用したマルチチャンネルコリメータ方式を採用する。中性子コリメータの具体的設計については、平成 10 年度から 12 年度にかけて実施された LHD 計画共同研究「高指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル測定の研究」にて、名古屋大学工学研究科の井口哲夫教授のグループとともに予備的な検討を行った。ここでは、この共同研究において得られた最重要な結果についてのみ記す。

LHD マルチチャンネルコリメータの設計は、中性子・ガンマ線輸送計算コード MCNP を用いて行った。この時、プロファイルモニタの設置位置は、4.5L ポート下の床空間とした。ここに、コリメータと中性子検出器群を設置する。中性子検出器の選

扱については後で述べる。床空間に設置できる架台強度の問題から、中性子コリメータの物質にはポリエチレンを想定した。コリメータ長を 10 cm から 150 cm の範囲で変化させて MCNP 計算を行い、プラズマから検出器へ直接飛来する中性子束と散乱等の相互作用を経て到達する中性子束の比を調べた結果、約 3 cm × 150 cm 長の直円筒コリメータを採用することが最適であるとの結論を得た。図 3.6.5-4 に、コリメータ設計計算に用いた中性子輸送体系、並びに中性子検出器の設置予定位置についての概略図を示す。

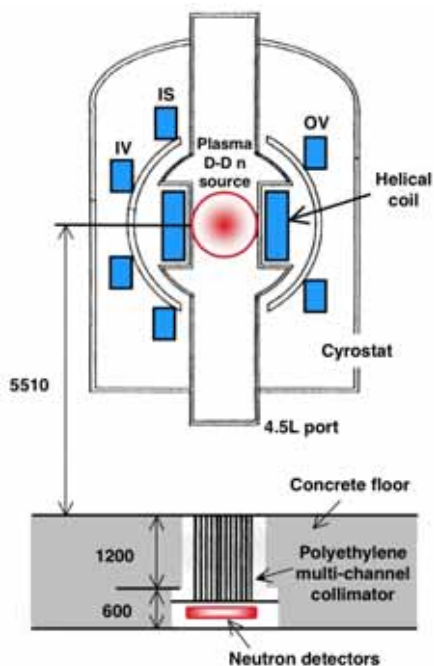


図 3.6.5-4 LHD の中性子プロファイル測定のためのコリメータを設計する際に用いた中性子輸送体系図(ポロイダ断面)。モデルは、実際よりも簡略化されている。ポリエチレンコリメータと検出器群は、床穴空間に設置する予定。

2) - 2 . 2 中性子検出器

測定位置は中性子線とガンマ線が混在した場になるので、中性子の検出には、中性子とガンマ線の弁別が可能なシステムが必要となる。具体的には、パルス波形弁別 (pulse shape discrimination : PSD) 回路を検出器に一体に組み込んだ形のスチルベン有機結晶シンチレータを第一候補として考える。このシステムは、JT-60U と JET で使用実績があり信頼性の高いものと判断できる。中性子のエネルギー付与によるシンチレーション光のパルスと、ガンマ線が作るそれは波形が異なる。PSD により、光電子増倍管出力波形をある一定時間積分することにより、即ち電荷の比較を行うことにより、中性子成分の判別が行われ、中性子に起因する信号のみを計数することができる。スチルベン有機結晶シンチレータは、NE213 等他のシンチレータに比して、所謂 n- 弁別性能に優れている。光電子増倍管には対磁気特性に優れたものを使用する。

以前に東京大学・原子力工学研究施設の高速度中性子源炉「弥生」において、高速度中性子ビーム照射によりスチルベン有機結晶シンチレータ (31.5 mm × t 25 mm) の指向性 (検出効率の中性子入射角依存性) を実験的に評価した。この時、入射角度が 30 度以下の小さい場合、ほとんど入射角度に依存しない測定結果を得ている。マルチチャンネル中性子コリメータを用いた中性子プロファイルモニタでは、中性子が十分にコリメートされて検出器に到達する。スチルベン有機結晶シンチレータが、この入射

角度領域でほぼ平坦な応答を示したことで、マルチチャンネル型中性子プロファイルモニタ用検出器として適当であると言える。図 3.6.5-5 に、この試験の際に使用した中性子検出器：スチルベン有機結晶シンチレータの全体写真と検出器内部の概略図を示す。

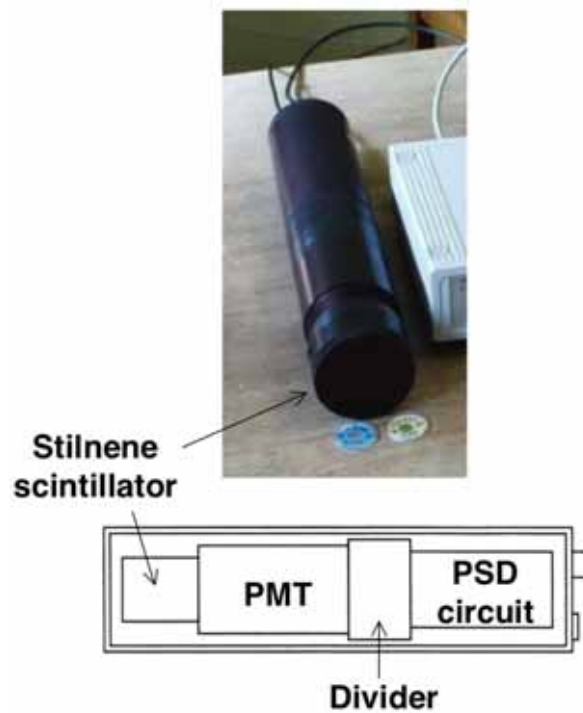


図 3.6.5-5 スチルベン有機結晶シンチレーション中性子検出器の全体写真と検出器内部の概略図

2) - 3 中性子エネルギースペクトル測定

ECH プラズマや、重水素プラズマに軽水素 (H^0) 中性粒子ビームを入射した場合など重水素イオンがマックスウェル分布をしていると考えてよい場合、D-D 中性子スペクトルのドップラー広がりを測定することにより燃料イオンである重水素のイオン温度を得ることができる。この時、中性子エネルギースペクトルは 2.45 MeV を中心にして、その半値幅はイオン温度 T_i の関数で、近似的に以下のように表される。

$$E \text{ (keV)} = 82.5 \cdot T_i \text{ (keV)}^{1/2} \text{ (D-D 中性子)}$$

プラズマ中にビームイオン等のテイル成分が存在する場合には、その存在を反映した形のエネルギースペクトルとなり、逆にそのスペクトル形状からビームイオンの速度分布関数の情報を得ることができる。

計測対象となるプラズマのイオン温度にも依るが、スペクトロメータの性能には、できるだけ高いエネルギー分解能を求めたい。LHD の重水素実験における D-D 中性子スペクトロメータには、市販の ^3He ガスグリッド付き円筒電離箱を第一に考える。 ^3He ガス電離箱は、高エネルギー分解能 (D-D 中性子に対して 1-2 %) と高検出効率を兼ね備えており、また使用方法も比較的簡便なため、従来より中性子断面積測定な

どの核物理実験やトカマクのオーミック加熱重水素プラズマにおける中性子スペクトロメトリに使用されている。中性子スペクトロメータは、LHD 装置近傍にコリメートした形で1基設置する。この場合、速中性子を検出するため減速材は用いない。なお、中性子プロファイルモニタでの使用を考えているスチルベンシンチレータにより中性子スペクトルの取得は原理的に可能ではあるが、エネルギー分解能(4-5%)の問題から有益な物理量を得るのは困難である。

2) - 4 14 MeV 中性子測定

一次反応の結果生成されたトリトン(1.01 MeV)がプラズマ中での減速過程において背景プラズマの重水素イオンとの間で核融合反応を起こし、微量ではあるが D-T 中性子(14 MeV)が発生する。LHD では、これまで述べてきた中性子計測システムに加えて、14MeV 中性子のみを選択的に検出する測定システムも整備する。

一放電あたりの D-T 反応の割合を調べるのであれば、放射化箔を用いるのが簡便であるが、これは先に述べたように時間積分した情報しか提供しない。核融合プラズマ実験においては、やはり放電中の時間変化に興味を持たれる。そこで、検出器には多数のプラスチックシンチレーションファイバを利用した指向性中性子検出器を考える。束のように並べた多数のシンチレーションファイバの軸方向を、プラズマに向けて設置する。ファイバコア材中でのトリトン燃焼中性子による反跳陽子の最大飛程(約2.2 mm程度)よりもファイバの直径を小さくすることで、14MeV 中性子に対して指向性を持たせることができる。ガンマ線やトリトン燃焼中性子よりも約2桁多いと予想される D-D 中性子が存在する場合において、大きなパルスのみを波高弁別することでファイバの軸方向に沿って入射したエネルギーの高いトリトン燃焼中性子に起因する信号のみを取り出すことができる。従来、大型トカマクでこの目的のため用いられてきた Si 半導体検出器は、耐放射線性が非常に悪く、真空容器近傍に設置した場合数ヶ月程度しか性能を維持できないという問題を抱えていた。この検出方式を採用することにより、長期間にわたって検出器の安定動作が期待できる。LHD の重水素実験ではこのタイプの検出器を、プラズマ全体を見込む形で1基、プロファイル測定を意図してコリメートした形で3基、計4基装備する。

3.6.5.2 高エネルギー粒子計測システム

1) はじめに

重水素プラズマでは、D-D 核融合反応の結果、トリトン(1.01 MeV)、 ^3He イオン(0.82 MeV)、プロトン(3.03 MeV)といった高エネルギーの核反応生成物が生成される。これらは、生成時に速度空間において等方的な形で放出される。

LHD の重水素実験では、核反応生成物の挙動を精査するために、損失核反応生成物を真空容器内で直接検出するシステム、損失高エネルギーイオンの衝突に起因する真空容器壁上の局所熱負荷を測定する赤外線カメラ、及び、MeV 領域の高速中性粒子の

エネルギー分布測定が可能なダイヤモンド検出器アレイの導入を計画している。損失核反応生成物の損失位置、並びにそのエネルギーやピッチ角 (v_{\parallel}/v) を詳細に調べることにより、それらの軌道損失過程を明らかにし、高エネルギー核反応生成物の軌道損失を抑えることのできる磁場配位の探求に役立つ。

また、協同トムソン散乱はプラズマ中に閉じ込められた高エネルギーイオンの速度分布関数を計測するのに適しており、そのイオンの減速過程を追跡することが出来る。高温・高密度プラズマに必要な高出力・単一モードかつ高繰り返し周期の炭酸ガスレーザーをプラズマ中に入射し、その散乱光を測定する。これにより、重水素実験では核融合反応で発生する MeV トリトン等の核反応生成物の速度分布関数を得ることが可能となる。

2) 実施計画

2) - 1 ヘリカルアレイ損失高エネルギーイオンプローブ

耐熱シンチレータを用いて、高エネルギー核反応生成物のエネルギー分布とピッチ角を同時計測する多チャンネルシステムを導入する。高速荷電粒子のセンサとなるシンチレータを金属ボックスの中に設置し、その一つの面に二段の入射口を設ける。核反応生成物の衝突によりシンチレータ上に現れるシンチレーション光の二次元分布は、イメージファイバにより真空容器外へ伝送される。この光の二次元分布を C-MOS イメージセンサ、もしくは CCD カメラにより測定することで、損失高エネルギーイオンのエネルギー分布とピッチ角を同時に測定することが出来る。この方式は、TFTR、CHS 等の装置で実績があり、通常損失高速イオンプローブと呼ばれている。また、軌道損失に加えて、トロイダルアルヴェン固有モード (TAE) に代表される高速イオン励起 MHD 不安定性により、高エネルギーイオンが異常損失する可能性がある。この場合、損失高速イオン束は、1 ミリ秒以下の短い時間スケールで変化する。高速イオン励起 MHD 不安定性に起因する速い現象を追跡するためにイメージファイバにより伝送されたシンチレーション光の二次元イメージをビームスプリッターで二系統に分け、一系統を高速測定が可能な光電子増倍管にて計測する。仮に核反応生成物が軌道損失するとすれば、その軌道に応じて、基本的には大半径方向の外側 (co-通過粒子) と内側 (counter-通過粒子)、また二本のヘリカルコイルの谷間の沿った位置 (ヘリカルリップル捕捉粒子) に損失してくると考えられる。本研究では、これらの位置に損失高速イオンプローブを並べてアレイ化し、損失核反応生成物の多地点検出を行う。核反応生成物の損失位置、即ち損失高速イオンプローブの設置位置については、今後詳細な軌道計算による検討を行った後に決定する。ZnS(Ag) に代表される荷電粒子用シンチレータに基づく損失高速イオンプローブは、ある一定量以上の粒子束を受けると性能が劣化することが知られている。よって、シンチレータの代わりとなる可能性を持つファラデーカップ型損失高速イオンプローブも二番目の選択肢として考える。この場合、シンチレータ型に比して耐放射線性には優れているが、エネルギー、ピッチ角分解能が幾分犠牲になる。図 3.6.5-6 に、ヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブの概略図を示す。

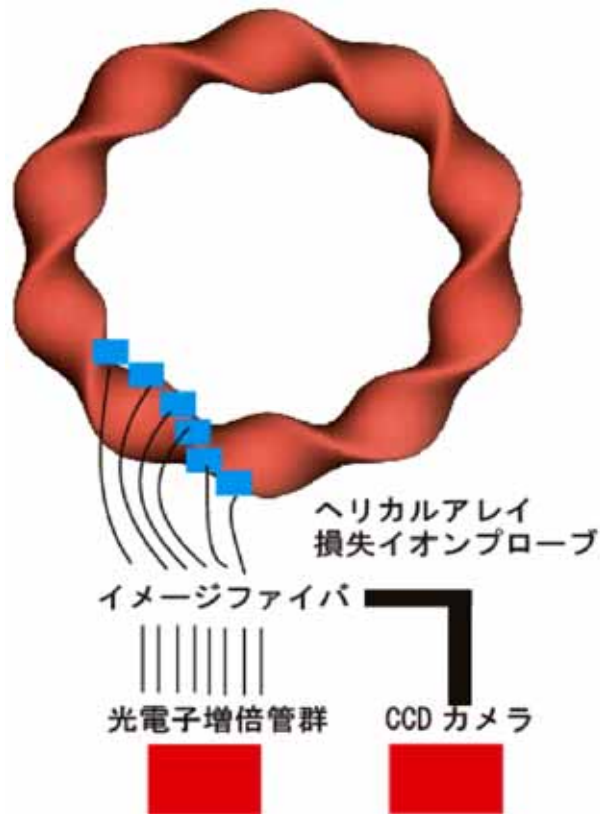


図 3.6.5-6 ヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブの概念図。

2) - 2 高速赤外線カメラを利用した損失高速イオン計測

軌道損失高エネルギーイオンは、最終的に真空容器壁に衝突する。LHD の重水素実験では、高エネルギーイオンが衝突すると見込まれる位置を見込む形で高速赤外線カメラを設置し、真空容器壁上の温度変化を観測する。これにより、高エネルギーイオンの損失位置、並びに損失量を定量評価できる可能性がある。本計測器の特長は、設置が比較的簡便で、真空容器内を広い領域にわたって計測できる点にある。一方で、本計測のみでは真に高エネルギー粒子損失に起因した熱負荷か否かを断定することができないため、先に述べたヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブと併用した形での使用が望ましい。

JT-60U では、高エネルギーバナナイオンの損失、並びに離散的トロイダルコイルが作る所謂 TF リップルに捕捉された高エネルギーイオンの損失によると考えられる局所熱負荷を赤外線カメラにより測定した後、粒子軌道計算コードとの比較が行われた。その結果、両者の間に良い一致が得られている。

2) - 3 高速中性粒子分析器

プラズマ中に閉じ込められた MeV 領域高エネルギーイオンのエネルギー分布は、

高エネルギーイオンの挙動を理解する上で重要な情報となる。そのために、MeV イオンがプラズマ中で不純物と荷電交換反応を起こした結果、閉じ込め領域から逃げてくる高速中性粒子を検出し、そのエネルギー分析を行う測定システムを用意する。高エネルギーイオンの径方向輸送を調べる観点から多チャンネル測定とする。具体的には、1) 検出器が小型であることから多チャンネル化が容易、2) MeV 領域の粒子測定が可能、3) 耐放射線性に優れている、等の特長を持つダイヤモンド検出器を選択する。ダイヤモンド検出器は、トカマク実験において MeV プロトンが荷電交換した後の高エネルギー水素原子の検出に成功しており、LHD の重水素実験においてもその性能を十分に発揮することが期待される。LHD では、重水素実験にむけて4個のダイヤモンド検出器を用意し、高エネルギー核反応生成物の閉じ込め研究を行う。図 3.6.5-7 に、検出器全体写真を示す。



図 3.6.5-7 小型高速中性粒子分析器：ダイヤモンド検出器の全体写真。

2) - 4 協同トムソン散乱計測

光源はポートサイズが小さいことやプラズマからの大きな背景光がないなどの利点から炭酸ガスレーザーを用いる。電子の協同的運動を観測することから、そのレーザーの散乱角は微小散乱角約1度程度となる。LHD の大半径方向外側の横長断面から入射した炭酸ガスレーザーは、トーラス中心部で入射周波数成分のみビームダンプで吸収される。ドップラーシフトされた散乱光は反射され、受信システムによりヘテロダイン検波される。

炭酸ガスレーザー、伝送システム、受信システムの設置と光軸調整を行う。その後、取得した計測データを処理するための収集システムを整備する。開発要素としては、高出力・単一モードかつ高繰り返し炭酸ガスレーザーとその受信システムを新たに開発する必要がある。炭酸ガスレーザーの単一モード化と高出力・高繰り返し化を徐々に進める。参考として JT-60U で使われた炭酸ガスレーザーの仕様を表 3.6.5-3 に記す。また、LHD における協同トムソン散乱計測の概要図を図 3.6.5-8 に示す。

表 3.6.5-3 炭酸ガスレーザーの仕様

Wavelength	10.6 μm
Laser power	15 J
Pulse width	10 μs
Repetition	$\sim 0.1 \text{ sec}$
Divergence	0.5 mRad
Diameter	4 cm

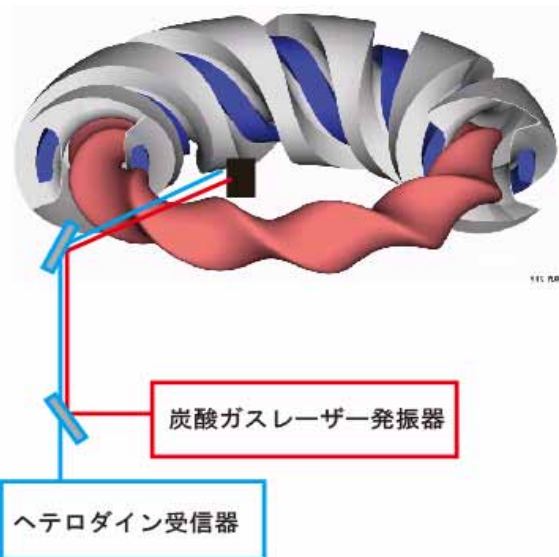


図 3.6.5- 8 LHD における協同トムソン散乱計測の概要図

3.6.5.3 高精度輸送計測システムの整備

1) はじめに

1) - 1 必要理由

重水素プラズマ中では熱や粒子の輸送障壁の生成により高閉じ込めが得られることが期待されている。輸送障壁とは熱・粒子の移動が遮断される領域のことで、要するに断熱層である。輸送障壁がなければプラズマをいくら加熱しても1億度にするには至難である。逆に、輸送障壁の圧力勾配を適切に制御できれば、ヘリカルに比べて定常維持が困難なトカマクにおいてさえ、自発的に発生するプラズマ電流の安定な維持ができるので、定常トカマク炉を作ることができると考えられている。すなわち、輸送障壁の生成と安定な維持が核融合実現の鍵である。

現在、トカマクやヘリカルでは輸送障壁の生成に成功しているが、その物理機構は未だ解明されていない。例えば、トカマクにおいては軽水素プラズマでは輸送障壁の

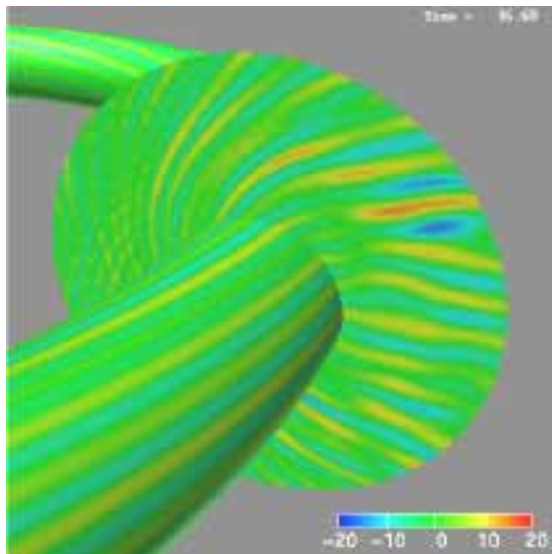
生成は困難であるが、重水素プラズマ中では容易に輸送障壁が生成される。しかし、その理由は全く分かっていない。物理機構が不明のままでは輸送障壁の制御は困難である。そのため、輸送障壁の物理機構解明は重要な課題となっている。実際、各国は、輸送障壁の物理機構解明の激しい競争を行っている。

1) - 2 目的

本計測システムの究極の目的は輸送障壁の物理機構解明である。

輸送障壁の物理機構の有力な理論は、「激しい熱伝導を引き起すのは乱流であり、

(a) 帯状流発生前



(b) 帯状流発生後

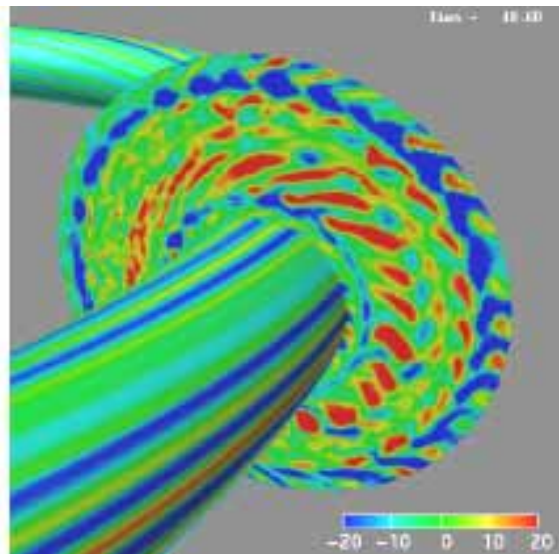


図 3.6.5-9 帯状流の発生前と発生後の乱流構造の変化。(T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando | Marger, Proc. Joint Varenna-Lausanne International Workshop on Theory of Fusion Plasmas, AIP, 2006.)

帯状流が乱流構造を遮断すると輸送障壁が生成する」というものである。例えば昔のガス風呂のように水を上から加熱しても風呂の表面の水は熱くなくても底は冷たいままとなる。そこで水をかき混ぜると均一の温度になる。流体は静かであれば熱伝導は良くないが、かき混ぜる(乱流をつくる)ことで非常に大きな熱伝導を引き起こす。

理論では、図 3.6.5- 9 (a)に示すように、プラズマには内と外をかき混ぜる大きな乱流構造がありそれが粒子を拡散し大きな熱伝導を引き起す。ところが、帯状流が現れると、図 3.6.5- 9 (b)に示すように、大きな乱流構造を引きちぎってしまう。(帯状流とは互いに逆向きの流れである。木星の縞模様も帯状流である。)乱流構造間では粒子が混ざらないために熱・粒子の移動が遮断される、というのである。

本計測システムの目的は、輸送障壁の物理機構解明のために乱流構造の可視化を目指すものである。

1) - 3 概要

乱流がなければ静かな水面のようにでこぼこは見られないはずだが、乱流構造は電子密度や電子温度の高い部分あるいは低い部分のかたまりとなり、それが運動するように見えるはずである。したがって、電子密度と電子温度の画像計測を行うことで、乱流を観測できるはずである。

しかし、乱流が磁気面上を動いても熱や粒子は逃げない。なぜならプラズマは磁気面が何層も重なって閉じ込めるものであり、もともと磁気面上では粒子も熱も自由に動けるからである。図 3.6.5- 9 (a)に見えるような磁気面を横切る乱流構造が粒子や熱の移動を引き起す。すなわち、深さ方向の運動が重要となる。そこで、平面画像だけでなく深さ方向も含めた、電子密度と電子温度の 3 次元高分解能計測が重要となる。

プラズマはほとんどの光では透明だがマイクロ波では不透明であり、色が付いていると言っても良い。プラズマから放射される電子サイクロトロン波はマイクロ波である。これは強度が電子温度に比例し、周波数が磁場に比例するため、局所的電子温度の時間変化測定の標準的計測法としてよく使用されている。また、プラズマは短波長の可視光では透明だが長波長の電波を反射する。透明と反射の境界がマイクロ波領域である。この境界層でマイクロ波が反射されるが、その波長は境界での電子密度の自乗根に反比例するので、反射波の波長から電子密度がわかる。すなわち、境界層の揺動が反射マイクロ波の揺動となるので、大変鋭敏な計測が可能である。

マイクロ波の波長は長く、LHD プラズマの電子サイクロトロン放射 (ECE) の波長はおよそ 2 mm 前後であり、反射光の波長はおよそ 5 mm 前後である。分解能は波長の 5 倍前後であるので、反射マイクロ波イメージングの分解能はおよそ 25 mm 前後となる。空間分解能 25 mm でも大変有用だが、望ましい空間分解能はイオンが磁力線のまわりを回転する半径 (イオン・ラーマー半径、およそ 3 mm 前後) である。究極の空間分解能は電子のラーマー半径 (およそ 0.1 mm 前後) である。究極の空間分解能を得るためには可視光で測定すればよい。

中性粒子ビーム発光分光イメージングは可視光で電子密度揺動の空間分布の時間変化を測定できる。そのため、究極の空間分解能を得ることが可能である。ただし、発光強度が小さいため、低感度である。

これらのイメージング計測法では、マイクロ波イメージングは高感度だが低空間分解能、中性粒子ビーム発光分光イメージングは高空間分解能だが低感度である。電子サイクロトロン放射イメージングでは電子温度計測器であり、反射マイクロ波イメージングは電子密度の計測器である。したがって、これらをうまく組み合わせることが重要である。

特に、トロイダル方向に異なる複数の場所に設置することが重要である。主な理由は 2 点である。第一に、バルーニングモード等の局所的 MHD 不安定性を同定する場合、トロイダル方向の 1 ヶ所だけで存在し、他所では存在しないことを証明しなければならない。第二に、帯状流を同定する場合、トロイダル方向に一様に流れていることを証明しなければならない。

1) - 4 予想される成果

本計測システムでは乱流構造を可視化するために電子密度と電子温度の3次元高分解能計測を行う。「乱流構造の可視化を行う」ことは容易ではないが、本計測システムの完成により、少なくとも短波長のMHD不安定性と静電不安定性を可視化することが可能である。現在の理論では、これらの不安定性が乱流の主体と考えられているため、乱流の物理に大きく寄与可能である。

MHD不安定性とは磁気面の運動を伴う不安定性であり、磁気面が破壊すると急速な熱や粒子の損失が発生するので非常に危険な不安定性である。従来の計測器では短波長のMHD不安定性の観測ができなかった。しかし、研究の進展により、バルーニングモードとよばれる、まるで磁気面が風船のように膨らんで破裂するかのような短波長の局所的な不安定性がトカマクプラズマの性能の上限を決めていることが分かった。磁気面上では電子が自由にほぼ光速で走り回っているため、等電子温度面と磁気面は同一視できる。本計測システムの電子サイクロトロン放射イメージング(ECEI)では電子温度の3次元分布の時間変化が計測できるため、ヘリカルでもバルーニングモードのような短波長の観測が可能となり、ヘリカルプラズマの性能を決める物理機構が明らかになる。

反射するマイクロ波の周波数は電子密度で決まるため、反射マイクロ波は電子密度変動に大変敏感である。磁気面上では電子密度は一定であるため、反射マイクロ波イメージングによって電子サイクロトロン放射イメージングと同様、短波長のMHD不安定性の観測が可能となる。また、プラズマ中には電子温度が変化しなくても電子密度が変動する不安定性がありこれを静電不安定性と呼ぶ。現在の理論では、乱流は静電不安定性によって生成されると考えられている。また、静電不安定性は波長が短い。したがって、本計測システムの反射マイクロ波イメージング(MIR)が完成すると、従来未知だった短波長静電不安定性の物理研究が飛躍的に進歩すると思われる。

中性粒子ビーム発光分光イメージングが完成すると、振幅の大きな電子密度揺動を究極の空間分解能で観測可能である。とくに帯状流の幅は大変狭いので中性粒子ビーム発光分光イメージングが大いに期待される。

2) 実施計画

2) - 1 マイクロ波イメージングシステム

2) - 1 - 1 原理

図 3.6.5-10 に示すように電子は磁力線のまわりをマイクロ波の周波数で回転運動しているため、マイクロ波を放射・吸収する。高電子温度のプラズマからは強力なマイクロ波が放射される。これを電子サイクロトロン放射(ECE)とよぶ。ECEの周波数は磁場に比例し、場所によって異なる。したがって、異なる周波数のECEを同時測定することで深さ方向の電子温度を測定できる。このように周波数分解をするマイクロ波カメラを用いることで、電子サイクロトロン放射の3次元イメージング計測ができる。

また、プラズマは電波を反射する性質を持つ。反射周波数より高い周波数のマイク

口波は透過し、低い周波数は反射する。反射周波数は高密度では高く、低密度では低い。したがって周波数分解をするマイクロ波カメラを用いることで、反射マイクロ波の3次元イメージング計測ができる。

図 3.6.5-11 に典型的な LHD プラズマでの電子サイクロトロン放射の周波数と反射マイクロ波の周波数を示す。電子サイクロトロン放射の周波数は反射マイクロ波の周波数よりかなり高いので、ダイクロイックフィルタを用いて分離できる。マイクロ波領域のダイクロイックフィルタとは、アルミ厚板に円孔を開けたものである。遮断波長は孔の直径に比例する。核融合科学研究所ではダイクロイックフィルタをビームスプリッタとして用いるために、角度 45 度の円孔を開けたダイクロイックフィルタを開発した。

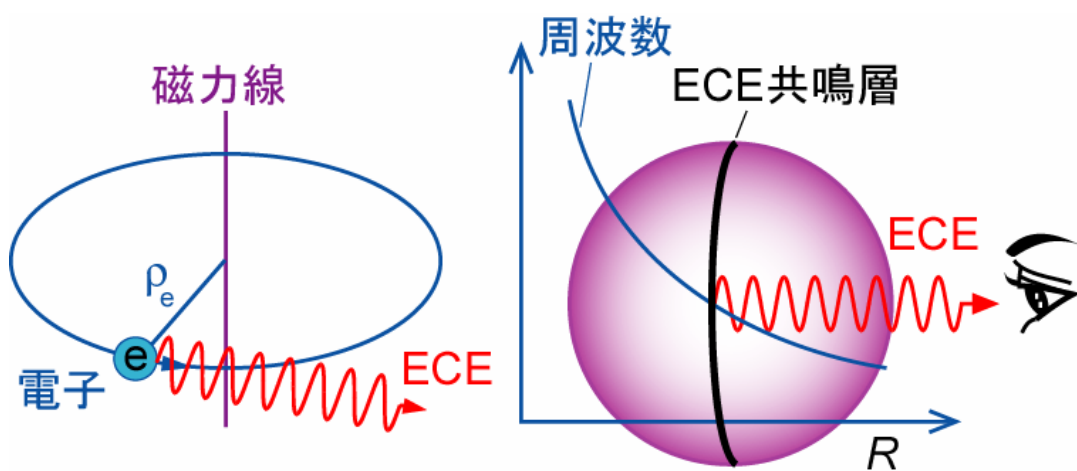


図 3.6.5-10 電子サイクロトロン放射 (ECE) の原理。

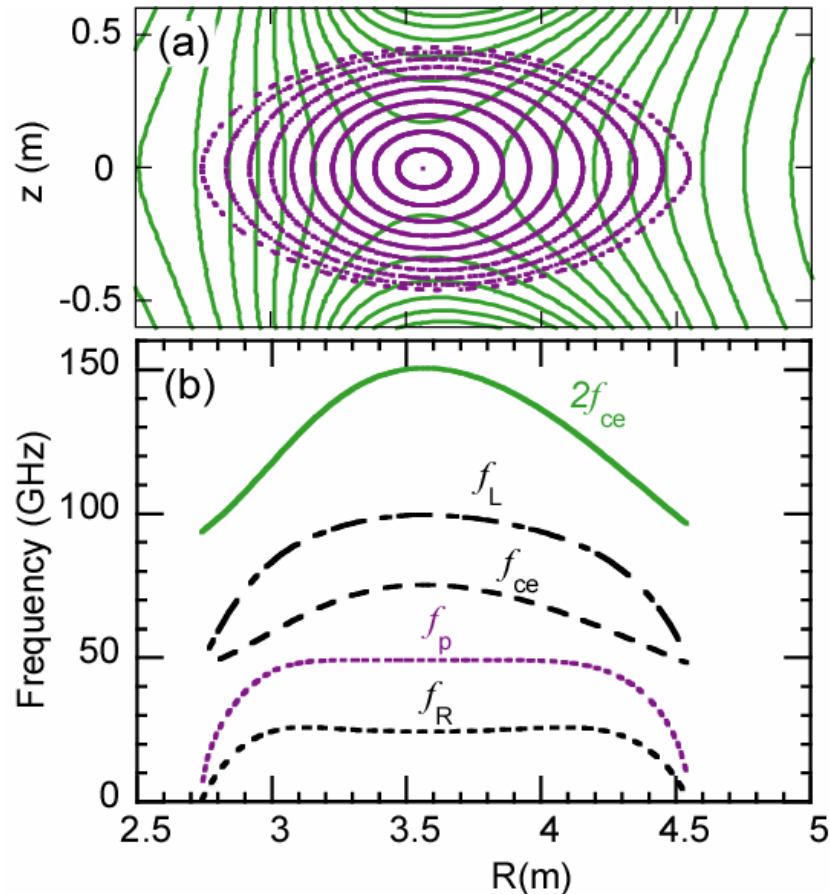


図 3.6.5-11 典型的な LHD プラズマでの電子サイクロトロン放射の周波数 ($2f_{ce}$) と反射マイクロ波の周波数 (f_p)

2) - 1 - 2 光学系と受信機

図 3.6.5-12 に電子サイクロトロン放射イメージングシステムと反射マイクロ波イメージングシステムの模式的光学系と受信機のブロックダイアグラムを示す。電子サイクロトロン放射と反射マイクロ波はダイクロイックフィルタを用いて分離することで、イメージング光学系を共用する。また、同じプラズマを電子サイクロトロン放射と反射マイクロ波の両方で観測することで、電子温度と電子密度の変動の時間差を計測でき、プラズマのダイナミクス観測の強力な武器とすることができる。

電子サイクロトロン放射イメージングシステムと反射マイクロ波イメージングシステムの受信機はほとんど同じである。その差は、検出器用発振器 (LO) の周波数とフィルタが異なるだけと言って良いほどである。これらはほとんど高周波プリント基板上に、マイクロストリップライン回路として作り込まれる。

両者とも 2 次元マイクロ波検出器でプラズマからのマイクロ波に LO のマイクロ波を混合し、中間周波数 (IF) に変換する。一度増幅後、もう一度、異なる周波数の高周波 (第二 LO) と混合し、第二中間周波数に変換する。第二中間周波数は全て同じ周波数であり、同じ周波数のフィルタを通した後、中間周波増幅後、検波し直流信号とする。

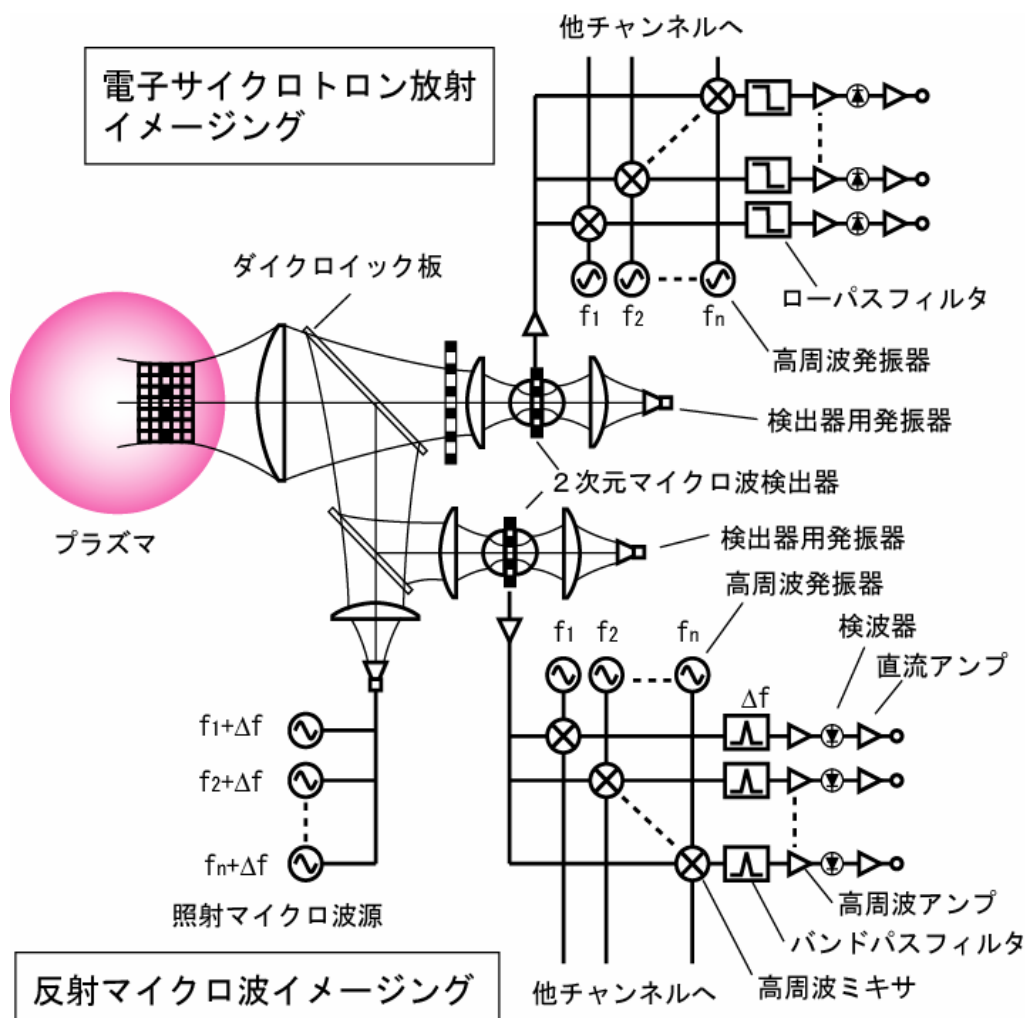


図 3.6.5-12 マイクロイメージングシステム。一つのイメージング光学系を共有し、ダイクロイック板で周波数分離をして、電子サイクロトロン放射イメージングと反射マイクロ波イメージングに分離する

2) - 1 - 3 電子サイクロトロン放射イメージングシステム

電子サイクロトロン放射イメージングシステムでは第二中間周波数についてローパスフィルタを用いる。その理由は第二中間周波数には、第二 LO の周波数を中心とした帯域のみを選択するためである。

また、フィルタの帯域は 300MHz ~ 500MHz と広い。これは、広い帯域の電子サイクロトロン放射周波数を検波することで大きな信号を得るためである。

2) - 1 - 4 反射マイクロ波イメージングシステム

反射マイクロ波イメージングでは複数の周波数のマイクロ波を混合して、プラズマに照射し、その反射を受信する。各周波数が、各電子密度に対応するので、広い周波数帯域を用いるとプラズマの半径方向の測定範囲が広がる。各照射マイクロ波源は検出器用発振器を元として、アップコンバータとマイクロ波増幅によって、差周波数と

位相まで検出器用発振器にロックした精密なマイクロ波である。これを用いることにより、第二中間周波数フィルタとして、中心周波数 110MHz、帯域 1MHz の狭帯域フィルタを用いることができる。そのため、高感度受信が可能となり、セルが小さいためホーンアンテナと比べて感度の低い 2 次元マイクロ波検出器であっても、高感度受信が可能となる。

2) - 2 中性粒子ビーム発光分光イメージングシステム

LHD プラズマは高温すぎてイオンが完全電離しており可視光を発光しない。そこで、中性粒子ビーム(NBI)を入射すると、完全電離イオンに NBI が持ち込む電子が結合して特定の波長の可視光を発光する。これを利用することで究極の空間分解能で乱流の可視化が可能である。これを「中性粒子ビーム発光分光イメージング」と呼ぶ。

中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムの概念図を図 3.6.5-13 に示す。中性粒子ビームからの発光を分光フィルタで特定の波長のみを取り出し、高速度カメラで受光する。光量が少ないのでいかに集光するか、背景光をいかに取り除くかが重要である。

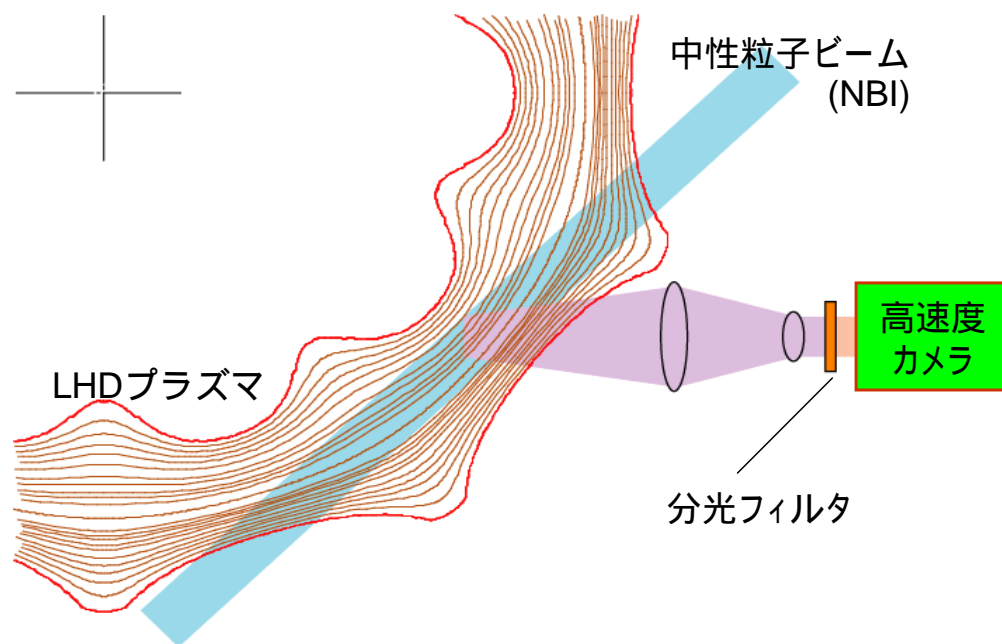


図 3.6.5-13 中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムの概念図

2) - 3 3次元トモグラフィー計測ステーション

直流信号には大きな直流オフセット成分があるので、直流オフセットを除いた部分を直流増幅し、デジタイザとコンピュータでデータ収集する。この直流オフセット除去回路は核融合科学研究所で開発し、現在使用中である。2次元マイクロ波検出器は空間的に多チャンネルのセルを持ち、周波数としても多チャンネル測定するので、1つのマイクロ波検出器当たり、大変多くのチャンネルの高速デジタイザが必要である。

また、トロイダル方向に2ヶ所、各所で電子サイクロトロン放射イメージングと反射マイクロ波イメージングをすればその4倍の、高速デジタイザで収集する。また、中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムでは高速2次元カメラでデータ収集を行う。1つのコンピュータで80チャンネルの高速デジタイザを持つことができるので、多くのコンピュータとデータ保存システムが必要である。データ保存システムとしては青色レーザーを用いたディスク型データ保存システムを想定している。

上記、3種類のイメージングシステムをトロイダル方向に複数ヶ所設置して得られるデータは、計算処理によって、不安定性の同定、乱流構造の物理的性質を求めることができる。計算処理としては局所計測である電子サイクロトロン放射イメージングが最も容易であり、電子温度の3次元分布およびMHD不安定性の3次元的可視化が可能である。

しかし、反射マイクロ波は視線方向の密度により位相変化を受けるため、トモグラフィ計算が必要である。また、どのイメージングシステムのデータであっても、乱流の波長や進行方向を求めるには、相関計算が必要となる。

すなわち、データ処理には、ハード的にもソフト的にもかなりの分量となる。しかし、これまでのLHDのデータ処理では毎ショット100MBもの膨大なデータを収集しており、十分な実績がある。

3.6.5.4 ダイバータ計測システム

主プラズマ閉じ込めの高性能化を目的とした重水素実験の一環として、ヘリカルダイバータの閉構造化を行う。閉構造化により、ダイバータで発生した不純物やリサイクリング粒子がプラズマ周辺部へ侵入することを妨げる。ペレット入射による主プラズマへの直接燃料補給と組み合わせ、主プラズマ閉じ込め性能の向上を目指している。

表 3.6.5.4-1 ダイバータ計測システムの計測対象と計測手法。

計測対象	計測手法
電子密度	分光、干渉計、トムソン散乱、粒子ビームプローブ、静電プローブ
電子温度	分光、トムソン散乱、粒子ビームプローブ、静電プローブ
イオン温度	分光、静電プローブ(イオンセンシティブプローブ)
不純物	分光、フィルタ付き CCD カメラ
プラズマ流	分光、静電プローブ(マッハプローブ)
放射パワー	ボロメータ
中性粒子圧力	高速イオンゲージ

バッフル構造内側のダイバータ室内には、排気設備を設けてリサイクリング粒子の排気を行う。これにより、高性能プラズマの長時間保持が可能となる。

最外殻磁気面近傍からダイバータへ至る輸送過程、ダイバータ室内におけるダイバータプラズマ特性を明らかにすることが本システム構築の目的となる。そのために必要な計測項目と計測手法を表 3.6.5-4-1 に示す。

周辺プラズマ領域の計測については、現行の計測システムが適用可能であるが、時間及び空間分解の、より高い計測が必要である。従来、高い空間分解能をもった周辺プラズマ分布計測を目的として高速駆動型静電プローブ計測が行われてきたが、高加熱入力及び長時間計測への対応は難しい。そこで、より優れた計測手法で、周辺プラズマ領域のパラメータ分布を高い時間分解能で、長時間計測できる計測システムを構築する必要がある。電子密度・温度計測については、周辺プラズマ計測に特化したトムソン散乱計測及びLiやHeを用いた粒子ビームプローブ計測システムを新たに構築する。

イオン温度については分光的手法を主として、高速駆動型静電プローブ(イオンセンシティブプローブ)による空間分解の良い計測も行う。

周辺プラズマ中のプラズマ流の計測については、現在まで行われていないが、静電プローブ計測手法の一つであるマッハプローブが適用可能であり準備を進めている。しかし上で述べたように高加熱入力への対応は難しく、やはり分光的手法による計測も立ち上げる必要がある。

LHDの場合、ベルジャーの中にプラズマ真空容器があるため、ポートからプラズマまでの距離が遠く、計測上問題になることがある。そこで、観測窓及びシャッターを備え、分光、ボロメータ、CCDカメラ等の計測機器を納めて、プライベート領域からこれら計測器を真空容器内へ挿入できる駆動型計測ステーションを設置する。これにより、周辺プラズマ及びダイバータ室外のダイバータレグプラズマ計測を詳しく行うことが可能となる。計測ステーションは、プラズマからの放射パワーによって温度が上昇しないよう、水冷を施す必要がある。

ダイバータ室内のプラズマは、ポートや上記計測ステーションからの計測は困難であり、ダイバータ室内に計測器を設置する必要がある。電子密度・温度計測用の静電プローブは、現行のダイバータ板埋め込み型が使用可能である。ダイバータプラズマ密度の高時間分解計測のため、干渉計をダイバータ室内に設置する。ダイバータ室を形成することにより、ダイバータ部の中性粒子圧力が従来の「開いた」ヘリカルダイバータ配位時に比べて増大し、プラズマと原子・分子の相互作用が促進されると考えられる。そのため分光計測による原子・分子過程計測は必須である。ダイバータ室内に光ファイバアレイを設置して分光計測を行う。放射パワー計測も分光計測と同様に、ダイバータ室内にボロメータ、例えばAXUVDアレイを設置してダイバータレグに沿った放射パワー分布計測を行う。ダイバータ室内の中性粒子圧力は、ASDEX型の高速度イオンゲージをダイバータ室内に設置して行う。図3.6.5-14に、ダイバータ部プラズマ計測の概要を示す。

3.6.5.5 定常・高速データ収集処理システム

1) はじめに

重水素実験では、通常の軽水素(H_2)を用いる実験に較べて大幅に実験回数が減ることから、1回の実験でより内容の濃い計測データ集録を行う必要がある。このため、

基本的に全プラズマ計測の定常実時間での運用と、揺動計測などに代表される空間的・時間的に大容量データを生む計測の超高速データ収集を行うことが求められる。同時に、実験遂行中あるいは次回実験が開始されるまでの短い時間内で、詳細なデータ解析をおこない、その結果をできる限り速やかに次回に反映させることができるよう、高速かつ実時間処理が可能なデータ解析計算機クラスタも稼働させる。

他方、重水素実験の間中は LHD 本体室への入室が制限されることから、計測器をすべて遠隔から自動制御および保守・監視できる環境を実現する必要がある。

現在、これらデータ収集および計測器制御で使用する LHD 実験用ネットワーク網は、通常の一般通信用のものが用いられている。重水素実験下の、より高い放射線環境化においても、上述のような超高速データ伝送が十分確保されるためには、これを通信エラー障害や性能劣化などが少ない耐放射線性の高い高速実験ネットワークに換えて敷設する。

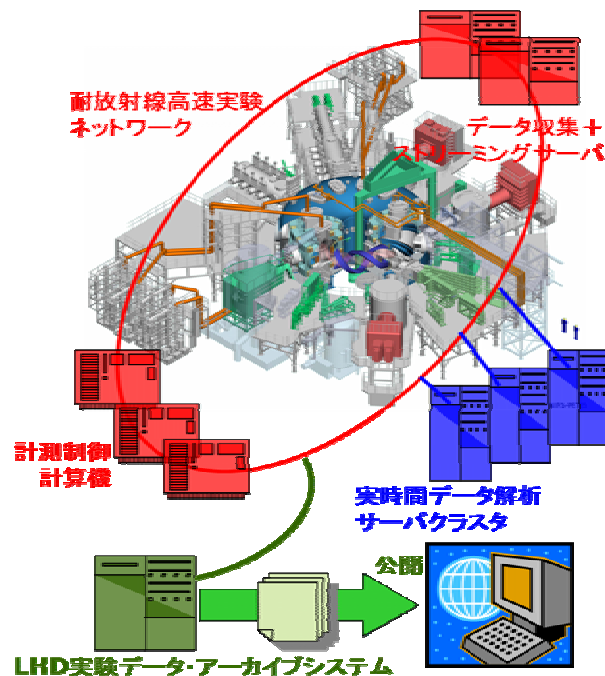


図 3.6.5-15 システム整備の概要

これら必要システム群について、以下のとおり、順を追って説明する。

1. データ収集+ストリーミングサーバ
2. 実時間データ解析サーバクラスタ
3. 計測制御計算機システム
4. 耐放射線高速実験ネットワーク
5. LHD 実験データ・アーカイブシステム
6. 上記の整備計画スケジュールと必要予算（概算）

2) データ収集+ストリーミングサーバ・システム概要

本システムは、高速サンプリング速度で多チャンネルのプラズマ物理計測データの生

成，収集，転送，格納，演算処理，表示(可視化)を連続無停止の実時間で実施するデータ集録装置である。本システムは，大別して以下に挙げる各機能を持つものとする。

- 多チャンネルデジタイザによるデータ生成
- コンピュータからのデジタイザおよび同集合体の(遠隔)制御と電氣的絶縁
- 生成データのコンピュータへの実時間転送
- データの実時間格納
- データの実時間可視化・遠隔での表示
- データの実時間解析演算 実時間データ解析サーバクラスタ
- データの高度解析処理による実時間機器制御信号の出力 計測制御計算機

最後の2項目については，「実時間データ解析サーバクラスタ」および「計測制御計算機」の各システムと関連しており，詳細は各節にて述べる。

以下に各機能の要求仕様の詳細を述べるが，基本的に可能な限りオープンスタンダードに準拠した仕様で実現するものとする。

2) - 1 デジタイザによるデータ生成仕様

核融合プラズマ実験において，アナログ信号をデジタル化するのに最も一般的に使用されるのが，トランジェントレコーダ型 ADC といわれる時系列波形を配列データ化するデジタイザである。ここでもこの方式の高速 ADC モジュールを主ターゲットとして，以下の通り，デジタイザに対する要求仕様をまとめた。

概略仕様

ADC モジュールは，標準 1 MHz のサンプリングレートで，8 チャンネル同時サンプリングが可能な A/D 変換機能を持つ。各チャンネルはそれぞれに独立したプリアンプ，16 ビット ADC，およびワンショット動作のための 4M ワード以上の波形バッファメモリを持ち，プリアンプ増幅率は 0.1～100 倍で，入力レンジは $\pm 2.5V$ ， $\pm 5V$ ， $\pm 10V$ ， $+2.5V$ ， $+5V$ ， $+10V$ に設定可能とする。サンプリングクロックは 8ch 共通で，ローカルクロック(の分周)か外部クロック入力を選択できる。

動作モードには大別して，ワンショット(バッチ処理)モードと，リアルタイム・ストリーム処理モードとを持ち，前者では従来どおりの短パルス実験と互換の収集動作を行う。後者では 1 筐体内に収納される 100ch 以上のアナログ信号を同時に無停止連続でデータ収集・転送できる能力を持たせる。

論理的仕様

- ADC 分解能 16 ビット
- サンプリングレート 標準 1 MHz，最低 0.1 MHz / 最高 10 MHz
全チャンネル同時サンプリング

- クロック 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHz, ..., 500kHz, 1MHz ,
および DC ~ 1MHz の任意外部クロックが選択可能
デューティ 50%
- デジタル入力 外部クロック , スタート/ストップトリガーをもち
デジタイザで同期可能
TTL レベルで動作すること
- アナログ入力レンジ $\pm 2.5V$, $\pm 5V$, $\pm 10V$, $+2.5V$, $+5V$, $+10V$
チャンネル毎に設定可能
- 入力インピーダンス 100k 以上
- デジタイザ精度 0.1%以下 (フルスケール比)
- プリアンプ 0.1 ~ 100 でゲイン値が ch 毎に設定可能
DC ~ 1MHz のアナログ信号帯域で歪率が 0.1%以下
チャンネル間の入力絶縁のため平衡入力を推奨
- 割込み処理 収集制御コンピュータに割込み出力ができること

物理的仕様

- コネクタ形状 プッシュ・プル式かプッシュロック(バヨネット)式
ねじ込み式は不可
アース絶縁のため 2 極 LEMO コネクタを推奨
- チャンネル(コネクタ)数 1 筐体に約 100ch のアナログ信号が収容できること
- モジュール構造 デジタイザはモジュール単位で着脱増減可能なこと

機械的仕様

- 筐体形状 ユーロカード 6U サイズ程度とする
19inch ラックに収容可能である事

電氣的仕様

- アナログ絶縁性 チャンネル間でアナログ部は絶縁されていること
- 耐環境性 高い耐静電(ESD)・電磁ノイズ(EMS)・耐放射線
性をもち , 強磁場 , X 線を含む強電磁ノイズ , 中性
子束
の存在する核融合実験室環境で安定動作すること
- CMRR コモンモード除去比 70dB 以上
- ch 間クロストーク -60dB 以下

2) - 2 コンピュータからのデジタイザおよび同集合体の(遠隔)制御と光絶縁
以下 , デジタイザモジュールの集合体とそれを格納し動作させるシャーシ , バック
プレーン , コントローラなど全体一式をデジタイザ・フロントエンド(DFE)という。

- ホストから DFE の制御は、関数コマンドをベースとする。デジタイザ制御コマンドを発行してその結果を受け取ったり、あるいは DFE 側から割込み処理要求を受ける API ライブラリとして提供される。
- DFE はホストの周辺機器として DFE1 台ごとにドライバ経由で認識・制御される。
- 各モジュールはホスト(アプリケーション)にスロット順に静的に認識が可能である事。
- DFE-ホスト間の接続メディアおよび I/F には、数 100 Mbps 以上の帯域を持つ通信規格を使用し、DFE-ホストは一對一あるいは多対一で接続が可能である事。
但し、転送レート上問題がある場合は、一對多接続も検討する。
- 接続メディアは DFE-ホスト間の電氣的絶縁のため、光ファイバによるデジタル通信リンクが可能である事。

2) - 3 生成データのコンピュータへの実時間転送

- DFE-ホスト間の通信は、500kHz100ch(1MHz50ch)の全 ADC 出力である約 100MB/s 以上を、有限の遅れ(30ms)内でホストの主メモリー上まで無停止連続転送できること。
- 生データ転送前後での実時間圧縮・展開技法の導入は、詳細仕様の調査協議事項とする。
- 生データの実時間削減あるいはイベント駆動型データ収集法の導入は、将来の改良時の課題とする。

2) - 4 データの実時間格納と解析演算

- 約 100MB/s の実時間生データストリームをそのまま格納できる能力があること。
- 解析演算の結果得られたリアルタイム処理済データも実時間で格納できること。
- 複数台の PC で解析演算と格納の並行分散処理が進められる PC クラスタとし、計算機負荷によってその分散度合(台数、構成)を増減・調整できる構成にする。
- 実時間解析演算の開発ターゲットとして最重要なのは、空間的・時間的にデータ量が多い各種の揺動計測である。演算ルーチン・出力情報などについては詳細仕様の策定段階で別途定める。<Appendix A 参照>
- PC クラスタのハードウェア上で動作する OS は、Linux/UNIX あるいは MS Windows とする。

2) - 5 データの実時間可視化・音声化と遠隔表示

- 実時間データ可視化・表示機構実現のターゲットとして重要なのは、空間的時

間的にデータ量が多い各種の揺動計測である。グラフ画像やデータ更新など出力情報、クライアント動作の可視化プログラムとデータ収集ホストとの演算処理分担などについては、別途、詳細仕様の策定段階で、計測毎に調査の上、定める。<Appendix A 参照>

- Linux/UNIX 上で Xwindow ベースの表示プログラムを提供し、設定やユーザの簡単なコンフィグ・スクリプト記述により、多様なデータ表示ができるよう可能な限り汎用性を持たせる。
- MS Windows 上の場合、遠隔表示はターミナルサーバ機能の利用が望ましい。
- 処理後、音声波形化されたデータの音声出力もおこなえるようにする。
- リアルタイム表示画面は対話的にユーザが切替えられるようにする。

2) - 6 データの高度解析処理による実時間機器制御信号の出力

磁場揺動により磁気島が生成する場合を例にとって考えると、揺動成分の波形位相に同期させて CD 波を入射することで磁気島を抑制するなど、アクチュエータの準備により制御が可能になる。現在のところ LHD 磁場揺動計測では、磁気島（成長）の検出と制御信号の出力が、フィードバック制御出力の一つに考えられている。<Appendix A 参照>

この場合、磁気島注意報・警報システムなどの簡易出力（光 or 音）は、次節「実時間データ解析サーバクラスタ」のみで実現が可能であるが、アクチュエータ出力制御や計測器の運転を制御する場合には、「計測制御計算機」との連動が必須となる。

3) 実時間データ解析サーバクラスタ

大容量データを高密度に収集する重水素実験や定常実験では、実験遂行中にできる限り詳細なデータ解析を同時進行でおこない、同じ実験の運転維持や次の実験を策定するためのより高度な解析結果を得ることが、実験の質を決めるといっても過言ではない。LHD の定常・高速データ収集系により実時間で集録された計測データをこうした解析にかけるためには、当然、実時間で大規模解析計算が可能な高性能計算機が必要である。

高速かつ大規模なデータ解析を実行する環境としては、メインフレームと呼ばれるベクトル・プロセッサ型スーパーコンピュータがあるが、計算ジョブを投入するバッチ処理方式での利用が一般的であり、実時間処理の面では必ずしも有効な手段とはならない。計測データが多数サーバ PC から並行して同時生成されることを考慮すると、データ伝送のボトルネックを回避する意味からも、1 コンピュータにデータを集中させて解析処理を行う構成では、実効的な処理速度が上がらない恐れがある。そのため、実時間データ解析は、収集系と同じ PC サーバクラスタをとって、並列計算により高速処理を実現する構成が望ましい。図 3.6.5-16 にその概要を示す。

同サーバクラスタの規模としては、データ伝送のボトルネック回避には、最低、データ生成ノード数と同数以上の計算ノードによる構成が望ましいため、100 計測の場合、最低 100 ノード（200CPU コア）が基本構成として必要である。より高度なプラ

ズマ挙動を理解，あるいはプラズマのフィードバック制御をするため，プラズマ平衡解析，各種安定性解析，密度・温度プロファイル計算，粒子・熱輸送解析などを並行しておこなうには，更にその数倍のノード数が必要となる。

プラズマ計測データの詳細解析コードは，そのほとんどがメインフレームなどを用いるバッチ計算用として作られてきている。実時間データ解析のためには，それらをすべてリアルタイム処理コードとして改造し，PC クラスタ上の並列計算環境に最適化する作業も必須である。

4) 計測制御計算機

計測制御計算機の役割としては，前節の「実時間データ解析サーバクラスタ」で得られた解析情報を，加熱・プラズマ保持・計測機器など各種アクチュエータのフィードバック制御に用いるための制御ロジックを運用するほか，機器の対話的遠隔制御と常時状態モニター，実時間制御・制御インターロックも含まれる。特に，最後の項目では，より高い安定性が求められるため，コンピュータ上のソフトウェアによる柔軟かつ複雑なプログラム制御よりも，PLC (Programmable Logic Comtroller) によるソリッドステート・リレー制御盤（シーケンサ）を用いる。そのため，利用機器としては大別して，

1. 遠隔制御用コンピュータ
2. 機器制御ロジック・コントローラ (PLC)

の2種類の制御機器を併用し，1はプログラム修正により柔軟な制御ロジックの変更に対応，2はより安全に機器等の保護シーケンス動作を保証するものである。1. 2.の装置自身も耐放射線性，中性子束環境下での安定動作が求められると同時に，保守機会をできるだけ提言するメンテナンス・フリーのハードウェアを，全100計測の約半数にあたる50セット導入する。

重水素実験に伴い，計測器やその周辺装置の多くは遠隔自動運転を余儀なくされ，しかも，保守機会も大幅に制限されることになる。殊に障害発生時など，各装置の状況を正確かつ迅速に把握するには，通常の制御・状態信号線の他に，より精緻かつ多面的な遠隔状態監視機能が必要となる。入室が制限され困難になる現場視認には，1計測器につき10個以上の機器監視カメラを設置し，多角的な状態監視ができる状況を整える。

5) 耐放射線高速実験ネットワーク

実験ネットワークは用途別に，以下の4つに分類される。

1. データ収集用高速ネットワーク
2. 計測制御コンピュータ用ネットワーク
3. 制御信号 (PLC) 用ネットワーク
4. 保安 (保護インターロック) 用ネットワーク

これら全ての線材を更新する必要はないが，より高速伝送が求められる上位2項目と，現状で安価なプラスチックファイバーが使用されている3.については，耐放射線性

の良い高性能光ファイバに置換する必要がある。

既設の通信用光ファイバに関しては，Appendix C．にあるとおり，LHD 本体室 CAMAC 室（中継）320 芯，CAMAC 室 計測機器室(1)(2)(3) 360 芯，CAMAC 室 データ処理計算機室 240 芯と，既に約千本弱が実験に供されている。また，シールドされたケーブルダクトを通して，約二千本の計測信号用同軸ケーブルが LHD 本体室 CAMAC 室間に設置されている。しかし，完全遠隔化が必要な重水素実験においては，更にこの 2～3 倍の芯数が必要となる。

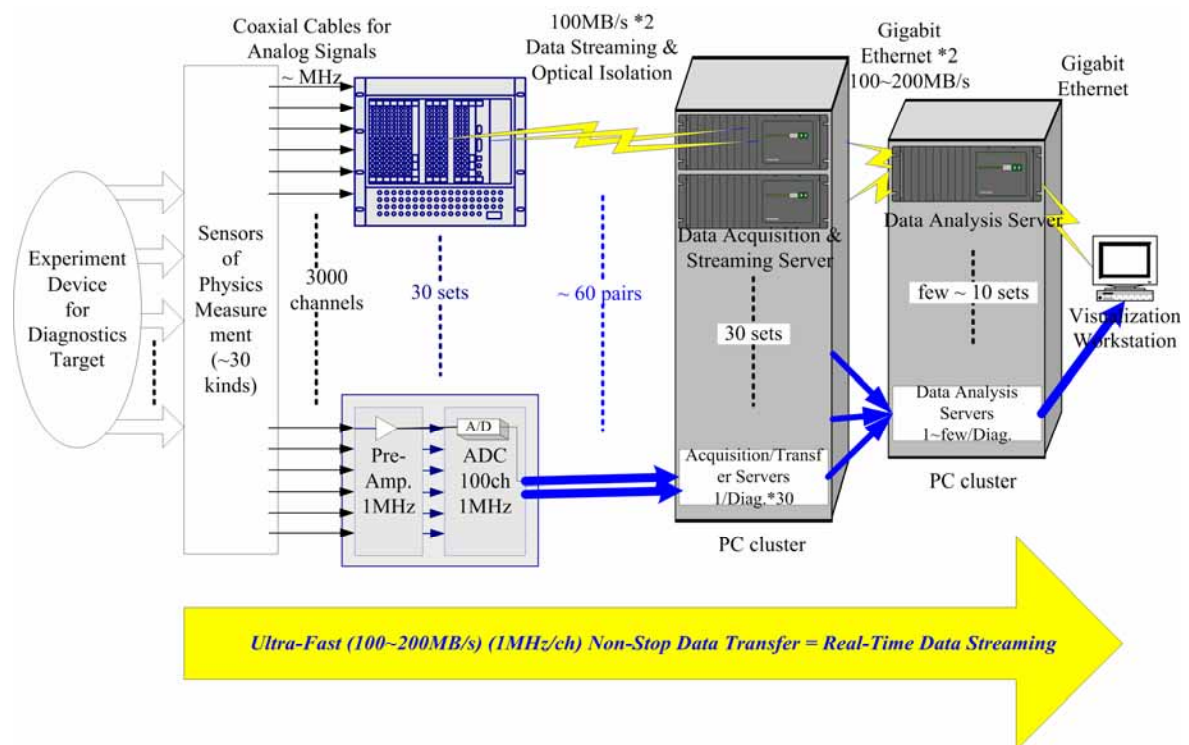


図 3.6.5-16 データ収集 + ストリーミングサーバと実時間データ解析サーバクラスタとの関連の様子

6) LHD 実験データ・アーカイブシステム

LHD 計測データ・システムでは，稼動当初より「データ爆発」を予期しており，高圧縮率が得られる可逆（ロスレス）な各種圧縮法を比較調査し，その結果を元に選定したアルゴリズムをシステムに組み込み利用してきた。そのため，実験開始当初より，常時，収集生データの 1/3～1/4 に縮められたデータ保管・ネットワーク伝送サイズを実現しており，見た目上のデータ取出し速度の向上にも大きく寄与してきた。（図 3.6.5-17）

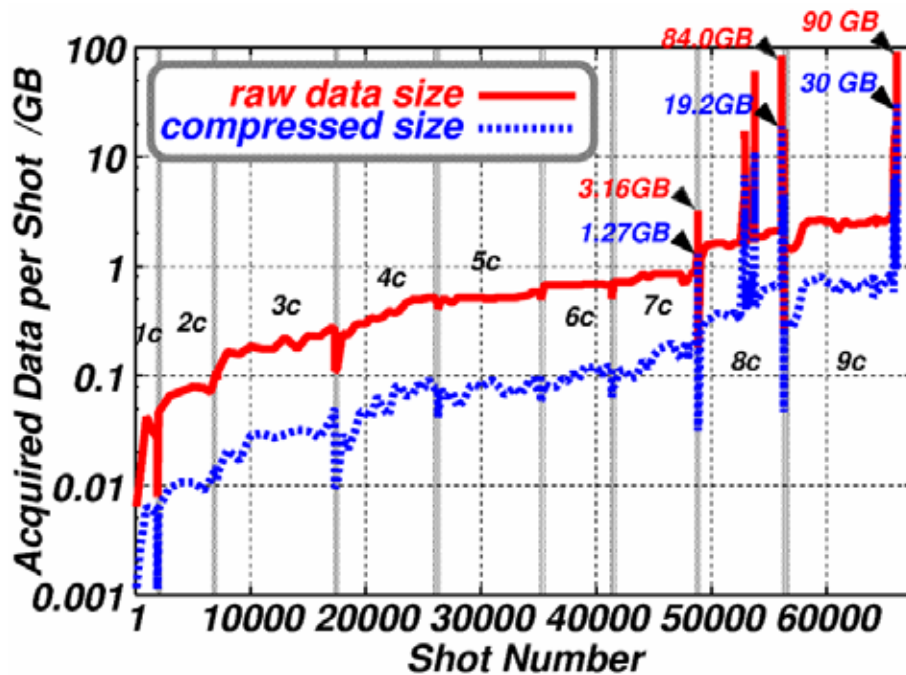


図3.6.5-17 LHDにおける1回の実験あたりに収集された計測データ量の推移。横軸は実験回数を示し、1c ~ 9cは実験期間(サイクル)をさす。黒三角()は平成 15,16,17 年度の世界記録更新値。

しかし、こうした保管サイズ低減の努力にも関わらず、実験データ爆発の勢いは強く、1 実験あたりの収集データ量はこの 10 年間で約 2 桁の伸びを見せた。LHD データ・システムは大規模分散形態をとっており(図 3.6.5-18)、災害・障害発生時のデータ防護に優れた多重化がなされているが、データの複製が二箇所(以上)に存在するため、保管装置の容量はその分必要になる。平成 18 年度現在、総容量は既にサブペタバイト(0.1 PB)レベルを超えており、重水素実験開始時には、1 PB 程度に到達する見込みであり、公開用データアーカイブには 10 PB クラスの容量が求められる。

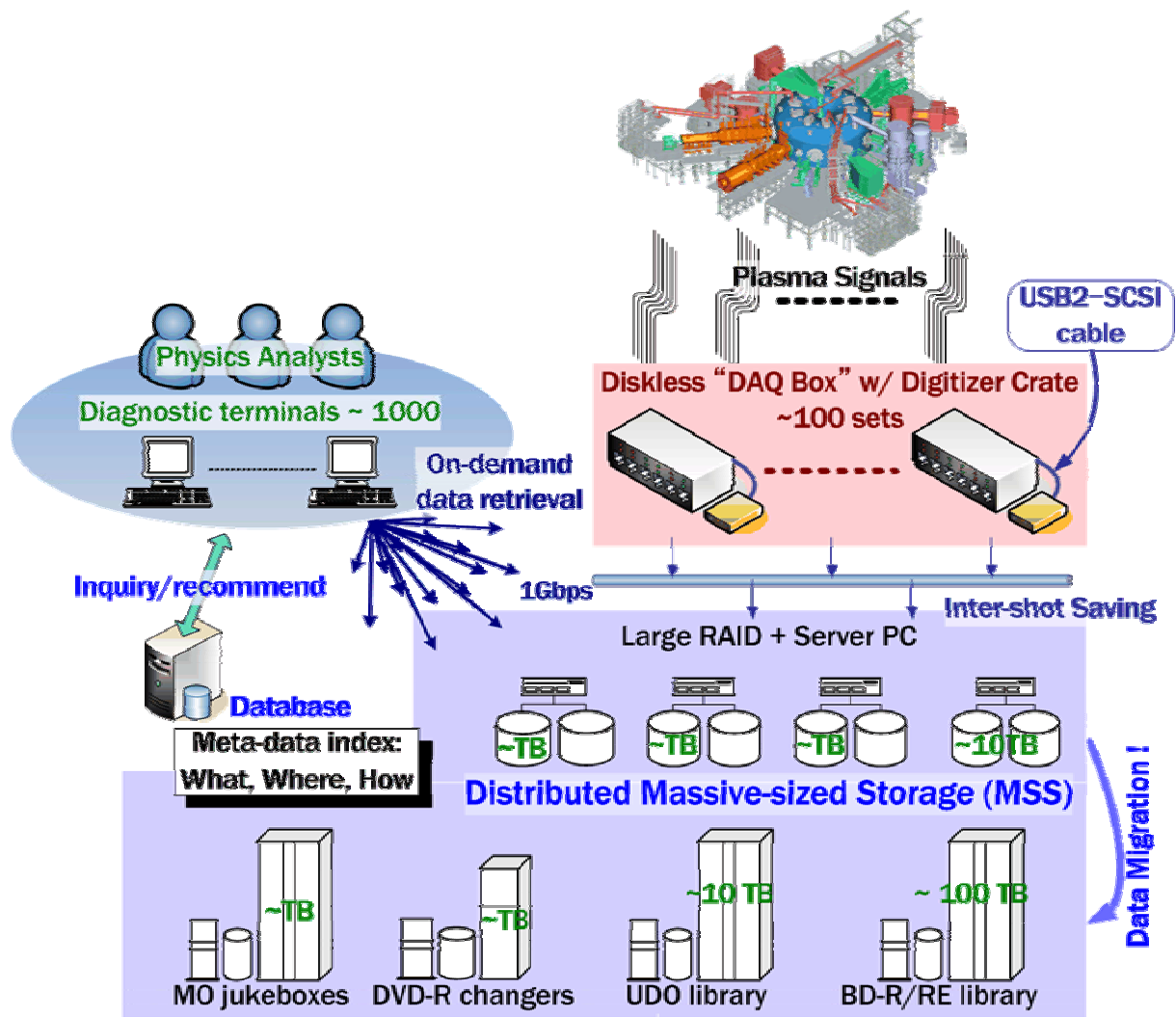


図 3.6.5-18 LHD データ収集系（右上部）と大規模分散データ保存システム（下部）の関連の様子。

こうした大容量のマルチメディア・データの中から，必要とする計測データをユーザがスムーズに取り出すには，実験データの付帯情報ばかりでなく，データそのものの類似性によって，実験波形や画像データを直接取り出す，波形・画像データ高速検索用データベース・システムの構築が不可欠であり，大容量メディア・アーカイブとの連携運用をおこなう。

データの大容量化が急速に進んでいる昨今，肥大化した計測データをすべて遠隔ネットワーク伝送して解析を行うのは，いかに通信速度が向上しても効率的解析環境とは言いがたい。そのため，遠隔からアーカイブシステムに直結された解析サーバ・コンピュータにリモートログインして，データは遠距離伝送をせず，代わりに操作・可視化データを遠方に飛ばす遠隔解析環境を整備する。

Appendix A . 【詳細仕様例】リアルタイム磁場揺動計測の解析演算と可視化仕様

現在、磁場平衡計測システムで処理されている Wp, Ip, Mp, サドルループ信号など約 20ch (入力 10ch) に関しては、本システムでほぼ同等以上の機能をリアルタイム化実装する。諸値は時間変化の一次元データなので、リアルタイムで横スクロールする x-t プロットを信号の数だけ実装する。

磁場揺動計測用の約 200 チャンネルのピックアップコイルアレイ信号については、新規に本システムによる実時間処理を実現する。仕様は以下の通り。

- Power Spectrum Density(PSD)の時間変化をカラー-contour プロット： 100kHz サンプリングの時系列データ 2048 サンプルで各チャンネル FFT をかけ周波数成分に変換。横軸：時間，縦軸：周波数のグラフで，周波数成分が強いところは赤く，弱いところは青くカラー表示し，どの周波数の揺動波が立っているか，またその時間変化を横スクロールで一目で判るように表示する。
- Coherence contour plot： PSD contour plot が周波数成分だったのに対し，空間のプラズマモード数(m,n)の各成分強度を全 196 チャンネル間の相互相関解析によって算出，縦軸：(m,n)，横軸：時間で同じく強度の強いところを赤，弱いところを青くするなどモード数成分の時間変化を表示する。
- モード数毎の成分強度変化： 縦軸：モード成分の強度，横軸：時間で (m,n)=(1,1),(2,1),(2,2),...のそれぞれの成分強度変化グラフを縦に幾つか並べて x-t プロット&横スクロール
- 磁気面表示： 縦長断面位置，横長断面位置での内部磁場構造を contour プロット。磁気島が生成しているなどがリアルタイムで見られると面白い。内部構造の演算モデルを埋め込む。

以上の表示画面が同時に複数表示できることが望ましい。一部は切替えで可。

Appendix B . LHD の計測データ収集サーバの現状 (平成 18 年度)

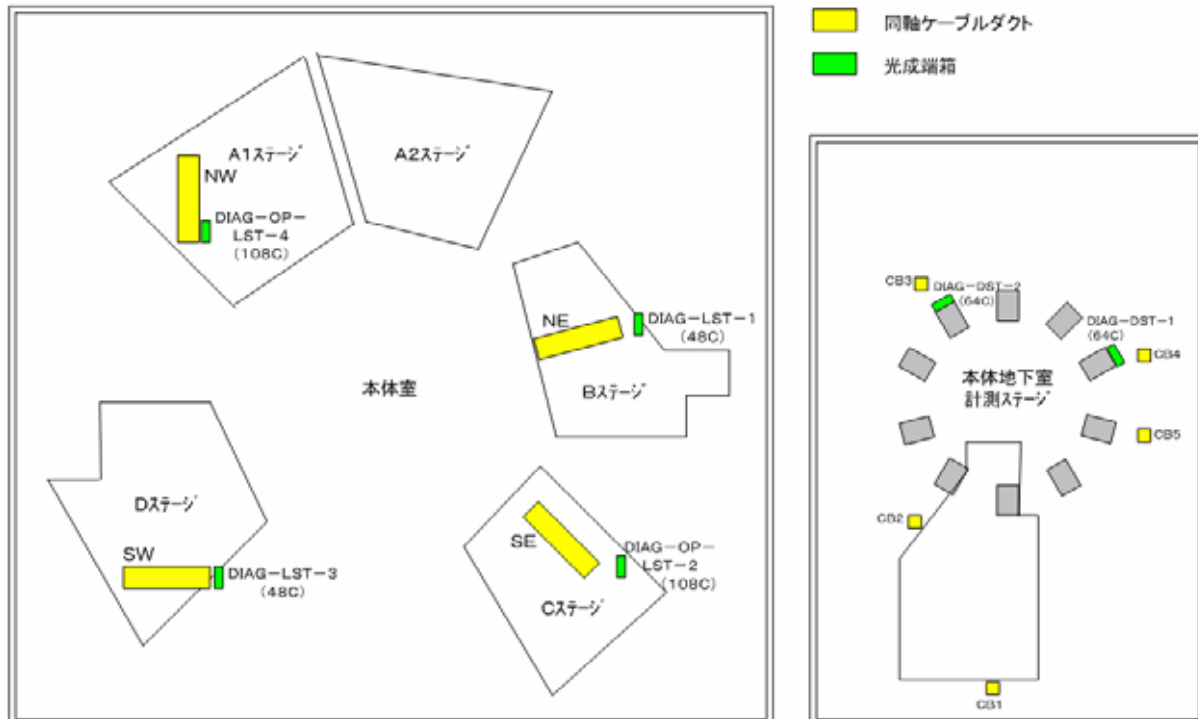
第10サイクル実験 収集サーバ割当表								[2006.10.5 改訂]
サーバ名	計測名	担当者	収集場所(ラック#)	使用モジュール	チャンネル数	OS	備考	PC機種
DAS01	SXfluc	大館	CAMAC室(#11)	SEG	81	XP Pro		Dell Precision410 移行
DAS02	Reflectometry	田中	CAMAC室(#18)	Aurora14	6			
DAS03	PHA	武藤	計測機器室3(#24)	PHA	6			
DAS04	ICHVOLT	関	RF現場制御室(#25)	Aurora14	78		独自光経路, CC/NET	
DAS05	SIFNA	斉藤	CAMAC室(#09)	PHA	6	XP Pro	10C増設	
DAS06	NBEL	長壁・駒田	制御棟 制御機器室	Aurora14		XP Pro	nbcurent生成	Dell Precision410
DAS07	CNPA	尾崎	本体棟Bステージ下	CTS308,A14		XP Pro	CC/NET	Dell Precision410
DAS08	Halpna	後藤(森田)	計測機器室3(#27)	Aurora14	126	XP Pro	独自光経路	Gateway6400 移行
DAS09	Brems	後藤(森田)	計測機器室3(#28)	Aurora14	120	XP Pro	独自光経路	Gateway6400 移行
DAS10	PHARD	武藤	計測機器室3(#24)	PHA	16			
DAS11	HIBP	井戸	本体地下室	Aurora14	36	XP Pro	HIBPcpへ移行予定	
DAS12	Bolometer	ピーターソン	CAMAC室(#14)	Aurora14	60			
DAS13	FIG	坂本	計測機器室2(#23)	Aurora14	6			
DAS14	MWRM	徳沢	計測機器室2	Aurora14	24	XP Pro	CC/NET	Dell Precision410
DAS15	SXmp	大館	CAMAC室(#13)	SEG	81			
DAS16	Fastion	磯部	計測機器室3(-)	PHA	12			
DAS17	ECH	久保	加熱装置室(#26)	Aurora14	30		独自光経路	
DAS18	ImpMon	後藤(森田)	CAMAC室(#05)	Aurora14	30			
DAS19	Magnetics	榊原	CAMAC室(#06)	Aurora14	78			
DAS20	Langmuir	増崎	CAMAC室(#02)	Aurora14	96			
DAS21	Langmuir2	増崎	CAMAC室(#01)	Aurora14	30			Dell Precision410
DAS22	TESPEL	田村(須藤)	計測機器室3	Aurora14	30			
DAS23	AXUVD	田村	CAMAC室(#07)	Aurora14	78			
DAS24	MMWINT	田中	計測機器室2	Aurora14	6			
DAS25	SX8O	大館	CAMAC室(#08)	SEG	67			
DAS26	RADL	稲垣(長山)	計測機器室2	Aurora14	72			
DAS27	GPCRADH	稲垣(長山)	計測機器室2	Aurora14	96			
DAS28	MO_server1	LABCOM	データ処理計算機室				(DAS欠番)	
DAS29	MO_server2	LABCOM	データ処理計算機室				(DAS欠番)	
DAS30	MO_server3	LABCOM	データ処理計算機室				(DAS欠番)	
DAS31	DTS	LABCOM	データ処理計算機室		176		VME-DTS情報収集	
DAS32	MMimg	田中	CAMAC室(#12)	Aurora14	114			Dell Precision410
DAS33	FIR1	徳沢	計測機器室1	C-PS 412	13		FIR-ana連携	
DAS34	FIR2	徳沢	計測機器室1	Aurora14	42	XP Pro	FIR-ana連携	Gateway6400 移行
DAS35	Lostlon	磯部	CAMAC室(#09)	Aurora14	12	XP Pro		
DAS36	Magnetics2	榊原	CAMAC室(#06)	Aurora14	36			
DAS37	Fixloop	成嶋	CAMAC室(#20)	WE7272	12	XP Pro		SS-5014C-MT移行
DAS38	FIR-WE7000	徳沢	計測機器室1	WE7272	16	XP Pro		SS-5014C-MT移行
DAS39	LiBP	森崎	本体室Cステージ下	WE7272,7275	56	XP Pro		SS-5014C-MT移行
DAS40	RADH	稲垣	計測機器室2	WE7272	32	XP Pro		SS-5014C-MT移行
DAS41	NB3arm	長壁	本体室(制御室経由)	WE7251	50	XP Pro	独自光経路	SS-5014C-MT移行
DAS42	FPellet	坂本	本体室Aステージ上	WE7275	13	XP Pro	10C増設	SS-5014C-MT移行
DAS43	Demodulator	LABCOM	CAMAC室(#20)	DTS8862	24		CAMAC-DTS	
DAS44	IRcamera-edge	長壁	CAMAC室(#10)	PXI-1409	2		MXI-3	SS-4U/MB交換, MXI-3
DAS45	NB1arm	長壁	本体棟 加熱装置室	WE7251	50		独自光経路	SS-5013C-T
DAS46	NB2arm	長壁	本体棟 加熱装置室	WE7251	50		独自光経路	SS-5013C-T
DAS47	GASPUFF	舟場	CAMAC室(#07)	WE7251	20	XP Pro		SS-5014C-MT移行
DAS48	LIP-ICCD	西浦	CAMAC室(#09)	PXI-1409	2		MXI-4	SS-5013C-MT, 4GB
DAS49	PCO2	田中	CAMAC室(#12)	PXI-6115	20		MXI-3	SS-4U/MB交換
DAS50	P2CO2	田中	CAMAC室(#12)	PXI-6115.6133	20		10C増設, MXI-3	SS-4U/MB交換
DAS51	DivIR	小川(増崎)	CAMAC室(#01)	PXI-1409	2		MXI-4	SS-5013C-MT, 2GB
DAS52	MWRM-PXI	徳沢	計測機器室2	PXI-6115.6133	20		MXI-4	SS-5013C-MT, 2GB
DAS53	SXCAMERA2	大館	データ処理計算機室				(DAS欠番)	
DAS54	FIR-PXI	徳沢	計測機器室2	PXI-6133	16	XP Pro	MXI-4	Trus P4-1U/7221
DAS55	CCDedge1	芦川	CAMAC室(#15)	PXI-1411	1		MXI-4	SS-5013C-MT
DAS56	HIBPcp	井戸	RF現場制御室	PXI-6133	48	XP Pro	MXI-4	Trus P4-1U/7221
DAS57	ICHPXI	関	CAMAC室(#12)	PXI-6133	24	XP Pro	10C増設, MXI-4	Trus P4-1U/7221
DAS58	MIR	山口聡(長山)	本体室	PXI-6133	16	XP Pro	MXI-4	Trus P4-1U/7221
DAS59	RePellet	坂本	CAMAC室(#05)	PXI-6115.6133	24	XP Pro	10C増設, MXI-4	Trus P4-1U/7221
DAS60	Magnetics3lab1	榊原	本体通信機器室	WE7272	64	XP Pro	Ethernet接続	Trus P4-1U/7221
DAS61	Magnetics3lab2	榊原	本体通信機器室	WE7272	28	XP Pro	Ethernet接続	Trus P4-1U/7221
DAS62	NB4arm	長壁・佐藤	本体室	WE7251	50	XP Pro	独自光経路	SS-5014C-MT
DAS63	Langmuir3	増崎	本体室	WE7275,7273	28	XP Pro	(再)	SS-5013C-T
DAS64	SDNPA	尾崎	計測機器室3	Toyo629, CTS504	7		10C新規, CC/NET	FMV 6333T7
DAS65	PelletAblation	坂本	CAMAC室(#05)	PXI-6133	56	XP Pro	10C新規	NEC Express5800/110GR-1c
DAS66	AXUVD-PXI	田村	CAMAC室(#7)	PXI-6133(2M)	40	XP Pro	10C新規	NEC Express5800/110GR-1c
DAS67	TESPEL-CCD	田村	計測機器室3	PXI-1411	1	XP Pro	10C新規	NEC Express5800/110GR-1c
DAS68	mwscat	稲垣	加熱装置室	PXI-6115	4	XP Pro	10C新規	NEC Express5800/110GR-1c
DAS69	LIP-PMT	西浦(井戸)	CAMAC室(#09)	PXI-6133	8	XP Pro	10C新規	NEC Express5800/110GR-1c

OS未記入は Windows 2000 Server SP4, PC機種未記入は HP Vectra XU 6/200

Appendix C . 実験ネットワーク網の現状（平成 18 年度）

同軸ケーブルダクト・光成端箱配置図

2000/6/27作成



光ファイバーケーブル配置図

2000.5.8作成

