

JAERI-Tech
95-028



TFTRのDT実験における放射線安全

1995年3月

宮 直之

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

TFTRのDT実験における放射線安全

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

宮 直之

(1995年2月27日受理)

TFTRのDT実験における安全基準，建家遮蔽，装置放射化対応及びトリチウム処理など放射線安全に係る対策状況についてまとめた。DT実験開始後10か月間のDT中性子発生量は $\sim 1 \times 10^{20}$ 個，使用したトリチウムはおよそ20gであった。DT実験に当たって本体室壁の一部を補強した。DT実験がTFTRサイト境界に及ぼす線量当量（直達線および放射化気体）の影響は，年間最大 1×10^{21} 個を想定した場合でも最大2.4mrem/yであり，サイト境界の線量当量限度10mrem/y以下で安全に実施されている。真空容器周辺での毎朝実験前の放射化レベルは最大100mrem/hである。サイト内トリチウムインベントリ5gの上限値から実験は現在2週間毎にトリチウム搬入出を実施しているが，今後サイト内でのトリチウムの回収再利用が可能となるようTPS設備を準備中である。DT実験終了後は真空容器内のトリチウム除去後，放射化レベルの低い部分から3年程の期間をかけて解体する予定である。

Radiological Safety of DT Experiments at TFTR

Naoyuki MIYA

Department of Fusion Plasma Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 27, 1995)

Radiological safety problems of TFTR D-T experiments are described. Some topical issues of safety, such as current regulations, radiation shielding, radioactivation and tritium processing on TFTR are reported. During D-T experiments around 1×10^{20} D-T neutrons were produced and 20g of tritium have been processed for the first ten months. Prior to the experiment interior walls inside Test Cell were clad with supplementary shielding panels. Contribution of radioactivity to annual property line total dose equivalent is less than 2.4 mrem for an estimated maximum D-T neutron yield of $1 \times 10^{21}/y$. This result is consistent with the design objective of limiting the total dose at the property line, 10 mrem/y. Activation dose rate near vacuum vessel reaches 100 mrem/h during operations. Because of the TFTR site limit of 5g inventory on-site, TFTR operations are currently scheduled to have an on-site delivery of tritium every two weeks and corresponding off-site shipment of tritiated water. TFTR installed and commissioned a Tritium Purification System(TPS) which will provide on-

site tritium purification and recycle capability. After the completion of two years D-T experiments, decontamination and decommissioning activities will commence for three years.

Keywords : TFTR Tokamak, Radiation Safety, Regulation, Nuclear Shielding, Activation, Decontamination, Decommissioning, Tritium Processing, Inventory, TPS.

目 次

1. はじめに	1
2. DT実験の概要	1
3. 放射線安全基準	2
4. 施設の遮蔽対策	3
4.1 遮蔽対策の概要	3
4.2 線量測定	3
4.3 サイト境界の年間最大線量当量	4
5. 装置の放射化	4
5.1 放射化の影響	4
5.2 放射化測定	5
5.3 放射化の計算評価	5
6. トリチウム処理	6
6.1 DT実験への対応状況	6
6.2 トリチウムの搬入出	8
6.3 トリチウム処理施設	8
6.4 安全対策	9
6.5 真空容器内インベントリとCleanup	10
6.6 TPS設備	10
6.7 問題点と今後の課題	11
7. DT実験後のDecommissioningについて	13
8. おわりに	13
参考文献	14
添付資料1 TFTR実験ログ(93年～94年9月のTASKPRINT)	36
添付資料2(1) TFTR実験ログ(94年5月27日のOPERPRINT)	40
添付資料3(2) TFTR実験ログ(94年5月27日のTASKPRINT)	42

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of DT Experiments	1
3. Regulations of Radiological Safety	2
4. Radiation Shielding of Site	3
4.1 Outline of Radiation Shielding	3
4.2 Radiation Measurements	3
4.3 Maximum Annual Dose-equivalent at Property Line	4
5. Radioactivation on Device	4
5.1 Radioactivation	4
5.2 Dose Rate Measurements	5
5.3 Evaluation by Radioactivation Simulation	5
6. Tritium Processing System	6
6.1 Preparations for DT Experiment	6
6.2 On-site and Off-site Shipping of Tritium	8
6.3 Tritium Processing System	8
6.4 Safety System	9
6.5 Tritium Inventory Inside Vacuum Vessel and Cleanup	10
6.6 TPS Device	10
6.7 Some Technical Issues	11
7. Decontamination and Decommissioning Schedule	13
8. Summary	13
References	14
Appendix 1 TFTR Experimental Log('93~'94.9, Taskprint)	36
Appendix 2(1) TFTR Experimental Log('94,27th May, Operprint)	40
Appendix 2(2) TFTR Experimental Log('94,27th May, Taskprint)	42

1. はじめに

1991年11月にJETで初めて行われたPTE（予備DT実験）[1-1]に続き、米国PPPL（プリンストン大学プラズマ物理研究所）のTFTRが93年11月よりDT燃焼実験を開始した[1-2～1-8]。しかもTFTRでは2年という長期間でもあり、ここ数年の間に一挙に本格的なDT実験の時代が到来した感じがある。こうした世界の大型トカマク装置におけるDT実験ではDTプラズマ性能の研究と並んで、放射線安全の確保の問題やトリチウムの取り扱い技術の開発が新たな課題となっている。

DT実験により施設周辺環境に与える放射線の影響評価は重要な課題である。またTFTR装置本体が放射化するため、装置の運転保守に係る本体周辺での線量当量増加の影響はDD実験より遥に深刻な問題である。TFTRでの放射化評価と運転経験から、将来の核融合装置の低放射化と安全設計に極めて有用な情報が得られるものと考えられる。また実験終了後の放射化した装置の解体法も今後の大きな課題である。JETでは0.2gのトリチウムを使用しただけであったが、TFTRでは20-30gを使用した。実際のトカマク装置で数十gまでの大量のトリチウムを扱う設備として、さらにまたトリチウムの循環再利用を目指す機能を備えた設備としてTFTRの実験規模は世界最大であり、この実験のために必要とした技術開発や修得した運転経験は今後の核融合開発を進める上で貴重な成果を与えるものと考えられる。DT実験で使用したトリチウムはNB Iクライオや真空排気系を通して回収処理されるが、その一部は真空容器内などに残留して系内インベントリを増大させる。こうしたインベントリを正確に評価するための手法の確立とそのための精度良い計量技術の開発も大きな課題である。

筆者は94年6月15日から同年10月14日までの4か月間、IEA 3大トカマク協定（JU34）に基づき、TFTR施設でのDT実験に参加する機会を得た。本報告書はこの間にTFTRの放射線安全について調査した結果をまとめたものである。DT実験における放射線安全基準、施設の遮蔽対策と周辺への影響評価、装置の放射化の状況、トリチウム処理の現状の紹介を述べ、最後に実験終了後の解体計画について触れる。参考文献にはこの期間中に発表された最新の文献を中心に記した。

2. DT実験の概要

DT実験の目的は、物理研究としてはDTプラズマの閉じ込め研究、アルファ粒子の閉じ込めとその効果の研究及び核融合出力10MWの達成などにあり、また工学的研究としてはトリチウム処理技術の開発やDT実験を安全に実施するための技術の確立などにある。DT実験は最初にトリチウムトレース実験(2%のトリチウムを使用)からスタートし、93年11月12日にファーストDTショットを得た。その後本格的なトリチウム実験を開始して12月10日に6.5MWの核融合出力に至る順調な成果を得た。しかしながらその2週間後にトリチウム処理系でバルブ故障やトリチウムリークなどのトラブルが発生したことにより、93年のDT実験はこれで一旦終了した。翌94年1月末からの実験再開後は再び順調に実験を進め、5月27日の実験で9.3MWの出力を得るに至っている。94年に入って

1. はじめに

1991年11月にJETで初めて行われたPTE（予備DT実験）[1-1]に続き、米国PPPL（プリンストン大学プラズマ物理研究所）のTFTRが93年11月よりDT燃焼実験を開始した[1-2～1-8]。しかもTFTRでは2年という長期間でもあり、ここ数年の間に一挙に本格的なDT実験の時代が到来した感じがある。こうした世界の大型トカマク装置におけるDT実験ではDTプラズマ性能の研究と並んで、放射線安全の確保の問題やトリチウムの取り扱い技術の開発が新たな課題となっている。

DT実験により施設周辺環境に与える放射線の影響評価は重要な課題である。またTFTR装置本体が放射化するため、装置の運転保守に係る本体周辺での線量当量増加の影響はDD実験より遥に深刻な問題である。TFTRでの放射化評価と運転経験から、将来の核融合装置の低放射化と安全設計に極めて有用な情報が得られるものと考えられる。また実験終了後の放射化した装置の解体法も今後の大きな課題である。JETでは0.2gのトリチウムを使用しただけであったが、TFTRでは20-30gを使用した。実際のトカマク装置で数十gまでの大量のトリチウムを扱う設備として、さらにまたトリチウムの循環再利用を目指す機能を備えた設備としてTFTRの実験規模は世界最大であり、この実験のために必要とした技術開発や修得した運転経験は今後の核融合開発を進める上で貴重な成果を与えるものと考えられる。DT実験で使用したトリチウムはNB Iクライオや真空排気系を通して回収処理されるが、その一部は真空容器内などに残留して系内インベントリを増大させる。こうしたインベントリを正確に評価するための手法の確立とそのための精度良い計量技術の開発も大きな課題である。

筆者は94年6月15日から同年10月14日までの4か月間、IEA 3大トカマク協定（JU34）に基づき、TFTR施設でのDT実験に参加する機会を得た。本報告書はこの間にTFTRの放射線安全について調査した結果をまとめたものである。DT実験における放射線安全基準、施設の遮蔽対策と周辺への影響評価、装置の放射化の状況、トリチウム処理の現状の紹介を述べ、最後に実験終了後の解体計画について触れる。参考文献にはこの期間中に発表された最新の文献を中心に記した。

2. DT実験の概要

DT実験の目的は、物理研究としてはDTプラズマの閉じ込め研究、アルファ粒子の閉じ込めとその効果の研究及び核融合出力10MWの達成などにあり、また工学的研究としてはトリチウム処理技術の開発やDT実験を安全に実施するための技術の確立などにある。DT実験は最初にトリチウムトレース実験(2%のトリチウムを使用)からスタートし、93年11月12日にファーストDTショットを得た。その後本格的なトリチウム実験を開始して12月10日に6.5MWの核融合出力に至る順調な成果を得た。しかしながらその2週間後にトリチウム処理系でバルブ故障やトリチウムリークなどのトラブルが発生したことにより、93年のDT実験はこれで一旦終了した。翌94年1月末からの実験再開後は再び順調に実験を進め、5月27日の実験で9.3MWの出力を得るに至っている。94年に入って

からももいくつかのトラブルが発生している。6月の中旬にNBIのSF6ガスが原因となるトリチウム処理系のトラブルが生じて、実験は1か月程中断した。また9月末からのIAEAを目前に控えた9月7日には真空容器に真空漏れが発生し、再び実験が中断した。この修理には放射化した真空容器による被ばく対策によって予想以上の時間がかかり、10月中旬になってようやく復旧した。その後の実験では大きなトラブルもなく、12月2日には核融合出力は10.5MWに至る成果を得て、DT実験の当初の目的のひとつを達成した。DT実験は当初94年中に終了の予定であったが、94年8月に米国議会での95年度予算が確定し、95年9月まで延期されることが決まった。

表2.1にTFTRでのDT実験週（93年11/12から94年10/10まで）の経緯と週毎の放電番号とDT中性子発生量を示す。93年から94年9月までの日毎の実験ログ（実験タイトル）を添付資料1として巻末にまとめた。1日平均50ショット弱の割合で実験が進められてきた。TFTRの放射化について述べる5章での理解を容易にするため、表中に94年1/3週を第1週とした時の週番号を付けた。従って93年の実験週についてはマイナス記号となっている。また93年11/1からの各実験週月曜毎の通算日を記入した。DT実験開始から94年8月の第34週までのおよそ10か月間における放電数はDD放電も含めて5000ショットを超えた。その内、実際にトリチウムを入射したDT実験放電は253ショットであり、この10か月間で計 1.27×10^{20} 個の14MeV-DT中性子（93年は 1.7×10^{19} 個、94年は 1.1×10^{20} 個）が発生した。

3. 放射線安全基準

TFTRは米国エネルギー省(DOE)の施設として許認可を得ており、原子力規制委員会(NRC)の規制対象外の施設(Non Reactor Nuclear Facility)である。しかし、その建設や運転に当たっては原子炉などに準ずる許認可手続きを行ってきた。TFTRは最も安全な部類の原子力施設であるLow Hazard Category III Nuclear Facilityに指定されている。

1993年からのDT実験に当たっては、トリチウムが核兵器の潜在的な材料として戦略上重要な核物質ということもあり、DOEの管理のもとに取り扱われてきた。そのため、この部類の施設では本来なら30gまでのトリチウム使用が可能であるが、DT実験の実施に当たっては、サイト内での常時の取り扱い量が5g以内に制限され、また安全上の観点から施設内の1ヶ所に2.5g以上のトリチウムを溜めないと言ったさらに厳しい規制をDOEより受けている。トリチウムの取り扱いは段階毎にDOEの施設検査にあたるORR(Operation Readiness Review)[3-1]を受けるとともに、1/100g単位での厳重な計量管理が実施された。

PPPLでの放射線量当量規制についてはDOEの定めるLegal Limit（法定基準）の他に、PPPLで適用しているDesign Limit（施設基準）がある。施設内においてはLegal Limit 5000mrem/年、Design Limit 1000mrem/年、またサイト周辺（最短180m）ではLegal Limit 100mrem/年、Design Limit 10mrem/年となっている[3-2, 3-3]。TFTRでは非常時を除き、この2つのDesign Limitのみで運用されている。管理区域内ではFilm Badgeの着用が必要なだけで、許可さえ得れば実験時間外の入室はいたって簡単である。日本の管理区域内外

からももいくつかのトラブルが発生している。6月の中旬にNBIのSF6ガスが原因となるトリチウム処理系のトラブルが生じて、実験は1か月程中断した。また9月末からのIAEAを目前に控えた9月7日には真空容器に真空漏れが発生し、再び実験が中断した。この修理には放射化した真空容器による被ばく対策によって予想以上の時間がかかり、10月中旬になってようやく復旧した。その後の実験では大きなトラブルもなく、12月2日には核融合出力は10.5MWに至る成果を得て、DT実験の当初の目的のひとつを達成した。DT実験は当初94年中に終了の予定であったが、94年8月に米国議会での95年度予算が確定し、95年9月まで延期されることが決まった。

表2.1にTFTRでのDT実験週（93年11/12から94年10/10まで）の経緯と週毎の放電番号とDT中性子発生量を示す。93年から94年9月までの日毎の実験ログ（実験タイトル）を添付資料1として巻末にまとめた。1日平均50ショット弱の割合で実験が進められてきた。TFTRの放射化について述べる5章での理解を容易にするため、表中に94年1/3週を第1週とした時の週番号を付けた。従って93年の実験週についてはマイナス記号となっている。また93年11/1からの各実験週月曜毎の通算日を記入した。DT実験開始から94年8月の第34週までのおよそ10か月間における放電数はDD放電も含めて5000ショットを超えた。その内、実際にトリチウムを入射したDT実験放電は253ショットであり、この10か月間で計 1.27×10^{20} 個の14MeV-DT中性子（93年は 1.7×10^{19} 個、94年は 1.1×10^{20} 個）が発生した。

3. 放射線安全基準

TFTRは米国エネルギー省(DOE)の施設として許認可を得ており、原子力規制委員会(NRC)の規制対象外の施設(Non Reactor Nuclear Facility)である。しかし、その建設や運転に当たっては原子炉などに準ずる許認可手続きを行ってきた。TFTRは最も安全な部類の原子力施設であるLow Hazard Category III Nuclear Facilityに指定されている。

1993年からのDT実験に当たっては、トリチウムが核兵器の潜在的な材料として戦略上重要な核物質ということもあり、DOEの管理のもとに取り扱われてきた。そのため、この部類の施設では本来なら30gまでのトリチウム使用が可能であるが、DT実験の実施に当たっては、サイト内での常時の取り扱い量が5g以内に制限され、また安全上の観点から施設内の1ヶ所に2.5g以上のトリチウムを溜めないと言ったさらに厳しい規制をDOEより受けている。トリチウムの取り扱いは段階毎にDOEの施設検査にあたるORR(Operation Readiness Review)[3-1]を受けるとともに、1/100g単位での厳重な計量管理が実施された。

PPPLでの放射線量当量規制についてはDOEの定めるLegal Limit（法定基準）の他に、PPPLで適用しているDesign Limit（施設基準）がある。施設内においてはLegal Limit 5000mrem/年、Design Limit 1000mrem/年、またサイト周辺（最短180m）ではLegal Limit 100mrem/年、Design Limit 10mrem/年となっている[3-2, 3-3]。TFTRでは非常時を除き、この2つのDesign Limitのみで運用されている。管理区域内ではFilm Badgeの着用が必要なだけで、許可さえ得れば実験時間外の入室はいたって簡単である。日本の管理区域内外

における週間線量規制に相当するものはない。

4. 施設の遮蔽対策

4.1 遮蔽対策の概要

TFTR建家は元々DT実験を前提に建設したものであるが、重水素実験における遮蔽再評価[4-1]に基づいて、Test Cell (本体室) 内北側遮蔽壁の新設、本体室内開口部の遮蔽補強などをDT実験を始める1993年までに実施した(図4.1)。元々あった120cm厚さの本体室コンクリート側壁の内側に30cmの遮蔽板を追加し、また実験中も常時人が作業するMockup建家に接する北側の壁にはさらに30cm厚さの遮蔽パネルを立てて補強した(写真4.1、写真4.2)。スカイシャインに影響する天井遮蔽については最初から十分な厚さ(1.3-1.7m)があったのでそのまま使用している。実際に本体室内に入ってみて気付くのは、予めDT実験を想定した設計であるため、側壁を貫く大きな配管、ケーブルダクトといったものがほとんど見当らなく、またTFTR装置の周辺空間が広くて実にすっきりした感じを受ける。TFTR東側のHot Cell内にはNBIイオン源電源などの設備があり、ショット間(短い時で15分程)に数名のテクニシャンが入ることがある。この場所ではDT放電1パルス(1.4×10^{18} DTn/shot)当たり0.6mrem[4-2]なので特に大きな被ばく線量ではないが、入り口開口部(Labyrinth部など)では線量が6-7倍高いところもあるので、実際には放電のカウントダウンを聞いて、放電中はHot Cell外に一時退避している。

計測系についても、DD放電に比べて2桁高い 10^{18} n/sを超えるDT実験の中性子発生率の下では、バックグラウンドノイズレベルの上昇、パルスパイルアップ、スペクトルの歪み、分解能の劣化といったトラブルが一層深刻な問題となる。TFTRでは、クウォーツファイバーの採用や一部の測定器を本体室から隣のHot Cell内へ移動するなどの処置をとった他、例えばDT実験で不可欠となるアルファ粒子荷電交換分析器やトムソン散乱を初めとする重要な計測器にはそれぞれの特性や構造に最適な遮蔽評価[4-3]を行なってボロン入りポリエチレンや鉛などの組み合わせによる遮蔽補強を実施した。

4.2 線量測定

TFTR周辺の線量当量値は本体室外壁に4ヶ所(N,W,S,E)、天井1ヶ所、地下3ヶ所に設置された中性子、 γ 線検出器で定期的に測定されている(写真4.3)。また施設周辺ではサイトフェンス4地点(NW,NE,SE,W)、近接サイト境界2地点(NE,SE)の計6地点(図4.2)において移動式トレーラーに格納した中性子、 γ 線検出器により測定されている(写真4.4)。中性子線検出器は ^3He 比例計数管式(25cmポリエチレンモデレータ、検出下限値 ~ 6 nrem/cnt)が使用されている。JT-60Uで使用している同タイプの検出器(検出下限値 $\sim 6 \times 10^{-4}$ mrem/cnt)と比べると、2桁感度が高い。 γ 線検出器は電離箱式(~ 2000 mrem/h, 検出下限値 ~ 1 nrem/cnt)である。較正にはNIST(National Institute of Standards and Tech.)の線源 $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ (中性子)、は ^{137}Cs (γ 線)を使用し、ANSI(American National Standards Institute)の基準N323 "Radiation Protection Instrumentation Test and Calibrations"に従って実施している。

における週間線量規制に相当するものはない。

4. 施設の遮蔽対策

4.1 遮蔽対策の概要

TFTR建家は元々DT実験を前提に建設したものであるが、重水素実験における遮蔽再評価[4-1]に基づいて、Test Cell (本体室) 内北側遮蔽壁の新設、本体室内開口部の遮蔽補強などをDT実験を始める1993年までに実施した(図4.1)。元々あった120cm厚さの本体室コンクリート側壁の内側に30cmの遮蔽板を追加し、また実験中も常時人が作業するMockup建家に接する北側の壁にはさらに30cm厚さの遮蔽パネルを立てて補強した(写真4.1、写真4.2)。スカイシャインに影響する天井遮蔽については最初から十分な厚さ(1.3-1.7m)があったのでそのまま使用している。実際に本体室内に入ってみて気付くのは、予めDT実験を想定した設計であるため、側壁を貫く大きな配管、ケーブルダクトといったものがほとんど見当らなく、またTFTR装置の周辺空間が広くて実にすっきりした感じを受ける。TFTR東側のHot Cell内にはNBIイオン源電源などの設備があり、ショット間(短い時で15分程)に数名のテクニシャンが入ることがある。この場所ではDT放電1パルス(1.4×10^{18} DTn/shot)当たり0.6mrem[4-2]なので特に大きな被ばく線量ではないが、入り口開口部(Labyrinth部など)では線量が6-7倍高いところもあるので、実際には放電のカウントダウンを聞いて、放電中はHot Cell外に一時退避している。

計測系についても、DD放電に比べて2桁高い 10^{18} n/sを超えるDT実験の中性子発生率の下では、バックグラウンドノイズレベルの上昇、パルスパイルアップ、スペクトルの歪み、分解能の劣化といったトラブルが一層深刻な問題となる。TFTRでは、クウォーツファイバーの採用や一部の測定器を本体室から隣のHot Cell内へ移動するなどの処置をとった他、例えばDT実験で不可欠となるアルファ粒子荷電交換分析器やトムソン散乱を初めとする重要な計測器にはそれぞれの特性や構造に最適な遮蔽評価[4-3]を行なってボロン入りポリエチレンや鉛などの組み合わせによる遮蔽補強を実施した。

4.2 線量測定

TFTR周辺の線量当量値は本体室外壁に4ヶ所(N,W,S,E)、天井1ヶ所、地下3ヶ所に設置された中性子、 γ 線検出器で定期的に測定されている(写真4.3)。また施設周辺ではサイトフェンス4地点(NW,NE,SE,W)、近接サイト境界2地点(NE,SE)の計6地点(図4.2)において移動式トレーラーに格納した中性子、 γ 線検出器により測定されている(写真4.4)。中性子線検出器は ^3He 比例計数管式(25cmポリエチレンモデレータ、検出下限値 ~ 6 nrem/cnt)が使用されている。JT-60Uで使用している同タイプの検出器(検出下限値 $\sim 6 \times 10^{-4}$ mrem/cnt)と比べると、2桁感度が高い。 γ 線検出器は電離箱式(~ 2000 mrem/h, 検出下限値 ~ 1 nrem/cnt)である。較正にはNIST(National Institute of Standards and Tech.)の線源 $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ (中性子)、 ^{137}Cs (γ 線)を使用し、ANSI(American National Standards Institute)の基準N323 "Radiation Protection Instrumentation Test and Calibrations"に従って実施している。

4.3 サイト境界の年間最大線量当量[4-2]

93年から94年にかけてのDT実験によるサイト境界（NE地点）の年間の線量当量評価を表4.1に示す。この表はDirect n, γ （直達線）といったPrompt Radiationの寄与については実測で得られた1放電当たりの線量当量値（図4.3、図4.4）から評価し、また放射化気体、トリチウムロスなどのDelayed Contributionは計算から求めてこれらをを組み合わせ示したものである。得られたAnnual Property Line Dose- Equivalent（年間最大境界線量当量）は、 1.7×10^{19} nのDT中性子を発生した93年は最大0.15 mrem、また年間 1×10^{21} nまでのDT中性子が発生することを想定した94年の場合は最大2.4 mremであり、いずれも年間Design Limit (10mrem)に比較して充分低い値となっている。

ここで94年を例にとってその内訳を見ると、Prompt Radiationの寄与については0.32 mremとそれほど大きくはないが、Delayed Contributionは2.1 mremもあり、後者の全体に占める割合が高いことがわかる。DDまたはDT放電で本体室内の空気が放射化することにより ^{13}N , ^{41}Ar , ^{40}Cl , ^{37}S , ^{16}N 等の核種が生成する。またNBI加熱装置のクライオ等に使用する LN_2 から ^{13}N が発生する。 LN_2 からの ^{13}N については1放電当たり15 mCiの放出を仮定して0.02 mremとして評価している。また、放射化空気の影響は短半減期の ^{16}N を除いた場合で0.73 mrem（表4.2）と評価している。さらにトリチウム処理の過程で施設外部へ漏洩するトリチウムについては、サイトの年間放出限界値500 CiがすべてHTOの形で大気放出した場合を仮定して1.3 mremと評価している。すなわち大量のトリチウムを扱うDT実験では、スタックから排出されるトリチウムがほとんどサイト境界線量を決定していることになる。TFTRではトリチウム入射の主力手段としてNBI加熱装置を使用しているが、6章で述べるようにイオン源からトラスへ入るのは僅か4%であり、残り大半はクライオ排気系を通して回収されてしまうため、これが全体のトリチウム量の増大をまねいてトリチウムロスを高める原因を与えている。今後さらに増大するトリチウム使用量を考えると、こうしたロスの低減化対策は今後の技術的検討課題と思われる。

94年1月から9月までの中性子発生量は 1×10^{20} nと最大想定発生量の10%に留まっております。またスタックから排出されたトリチウムも今のところ140Ciの範囲にある。従って、TFTRでのDT実験は表4.1に示した値より実際にはさらに低い線量レベルにあり、施設安全基準を充分下回る範囲で安全に実施されていると言える。

5. 装置の放射化

5.1 放射化の影響

DT実験開始後のTFTRでは、トリチウム処理設備で起きたトリチウムリークやNBI加熱装置の故障を除けば、直接本体に係わるような大きなトラブルはなく順調に来ていた。しかしながら1994年9月7日の最終ショットに真空リークが発生し、その修復作業のため、初めて装置放射化の問題と直面することとなった。これは主にリップル捕捉された高速イオンが真空容器と配管ポート付け根溶接部（真空容器下部）に集中して

4.3 サイト境界の年間最大線量当量[4-2]

93年から94年にかけてのDT実験によるサイト境界（NE地点）の年間の線量当量評価を表4.1に示す。この表はDirect n, γ （直達線）といったPrompt Radiationの寄与については実測で得られた1放電当たりの線量当量値（図4.3、図4.4）から評価し、また放射化気体、トリチウムロスなどのDelayed Contributionは計算から求めてこれらをを組み合わせ示したものである。得られたAnnual Property Line Dose- Equivalent（年間最大境界線量当量）は、 1.7×10^{19} nのDT中性子を発生した93年は最大0.15 mrem、また年間 1×10^{21} nまでのDT中性子が発生することを想定した94年の場合は最大2.4 mremであり、いずれも年間Design Limit (10mrem)に比較して充分低い値となっている。

ここで94年を例にとってその内訳を見ると、Prompt Radiationの寄与については0.32 mremとそれほど大きくはないが、Delayed Contributionは2.1 mremもあり、後者の全体に占める割合が高いことがわかる。DDまたはDT放電で本体室内の空気が放射化することにより ^{13}N , ^{41}Ar , ^{40}Cl , ^{37}S , ^{16}N 等の核種が生成する。またNBI加熱装置のクライオ等に使用する LN_2 から ^{13}N が発生する。 LN_2 からの ^{13}N については1放電当たり15 mCiの放出を仮定して0.02 mremとして評価している。また、放射化空気の影響は短半減期の ^{16}N を除いた場合で0.73 mrem（表4.2）と評価している。さらにトリチウム処理の過程で施設外部へ漏洩するトリチウムについては、サイトの年間放出限界値500 CiがすべてHTOの形で大気放出した場合を仮定して1.3 mremと評価している。すなわち大量のトリチウムを扱うDT実験では、スタックから排出されるトリチウムがほとんどサイト境界線量を決定していることになる。TFTRではトリチウム入射の主力手段としてNBI加熱装置を使用しているが、6章で述べるようにイオン源からトーラスへ入るのは僅か4%であり、残り大半はクライオ排気系を通して回収されてしまうため、これが全体のトリチウム量の増大をまねいてトリチウムロスを高める原因を与えている。今後さらに増大するトリチウム使用量を考えると、こうしたロスの低減化対策は今後の技術的検討課題と思われる。

94年1月から9月までの中性子発生量は 1×10^{20} nと最大想定発生量の10%に留まっております。またスタックから排出されたトリチウムも今のところ140Ciの範囲にある。従って、TFTRでのDT実験は表4.1に示した値より実際にはさらに低い線量レベルにあり、施設安全基準を充分下回る範囲で安全に実施されていると言える。

5. 装置の放射化

5.1 放射化の影響

DT実験開始後のTFTRでは、トリチウム処理設備で起きたトリチウムリークやNBI加熱装置の故障を除けば、直接本体に係わるような大きなトラブルはなく順調に来ていた。しかしながら1994年9月7日の最終ショットに真空リークが発生し、その修復作業のため、初めて装置放射化の問題と直面することとなった。これは主にリップル捕捉された高速イオンが真空容器と配管ポート付け根溶接部（真空容器下部）に集中して

当たり、接合部分が溶けたことによってここからエアリークしたものであった。作業対象となる配管フランジ部でのリーク発生5日後のContact Doseは125mrem/h、50cm離れた作業者の平均でも45-50mrem/hと高い値を示していた。TFTRではこの作業につき1人50mrem以下、すなわち1時間以内の制限をつけて作業を行ったので、これが修復に時間がかかる原因となった。DT実験は10月中旬から再開されたが、9月中に予定されていたIAEA用の高Bt(5.6T)でのHigh Power実験などが結局全て中止となった。こうした状況に見られるように、TFTRのDT実験では放射化による装置運転への影響が現われ始めている。

5.2 放射化測定

真空容器周辺の放射化の度合いは、本体室内真空容器から1mほど離れた地点3ヶ所(R=4.9m、図5.1のBAY-C,L,Q地点)に置かれた γ 線モニターで定期的(15分毎)に測定されている。BAY-Cの検出器(図4.1の平面図)の毎日の測定結果[5-1]を図5.2に示す。DT実験開始後340日(10カ月)間の毎朝6:30(放電毎の影響の少ない実験開始前)の線量当量値(●印)は、日毎の中性子発生量に応じて鋸の歯のように変化している。半減期がおよそ1日以下の短半減期核種についてはこのグラフには表されていない。途中、50日から110日目、及び310日目以降に見られる減衰期間は、それぞれ93年12月から94年1月末にかけて発生したトリチウム系のトラブル処置、及び94年9月の真空リーク修復による実験中断期間に対応している。このグラフから毎朝の線量最大値はおよそ100 mrem/hである。

DT中性子発生量の積算値(▲印)はDT実験開始後300日間で 1×10^{20} nに達している。中性子発生量の積算値の増加とともに、線量のベースが増大しているのが分かる。これは長半減期核種 ^{60}Co の蓄積によると考えられる。インコネル製真空容器のJT-60U[5-2]などとは違い、ステンレス製真空容器のTFTRでは ^{58}Co の寄与が少ないため、今のところは最大ピーク値も1週間位で減少するが、 ^{60}Co で決まるベース線量はこの10カ月で約10倍に高まっており、ベース分の増加の傾向が早く現れている。

ショット毎の線量については15分毎の詳細データに示されている。これを最大Fusion Powerを達成した5月27日を例にとって図5.3に示す。この図には線量当量値(○印)とDT放電毎のDT中性子発生率(▲印, SnDT@TMAX)を示した(当日の実験ログ:添付資料2(1) OPERATION PRINT Output, 添付資料2(2) TASK PRINT Outputを参照)。この日はショット#76769(15:35)からFusion Power 9.3MW($\sim 3 \times 10^{18}$ n/s)を達成したショット#76778(18:29)までの5ショットのDT放電が実施されている。線量当量の最大値は、ショット毎の中性子発生量や γ 線検出器のデータ収集のタイミングによってバラツキがあると考えられるが、7000 mrem/hを越える値が検出されていることがわかる。

5.3 放射化の計算評価

こうした測定結果は最近行われた放射化計算評価とも良く一致している。TFTRのDT実験時の放射化評価については、これまでも報告[5-3]があるが、これは当初の2年間の想定合計発生量 2×10^{21} nの下に行われており、DT実験開始後の実績($\sim 1 \times 10^{20}$ n/10

カ月) から見ると過大評価となっている。一方、DT実験の実績に対応して最近行われた評価結果[5-4]を図5.4から図5.6までに示す。図5.4は表2.1で示したDT中性子発生量をグラフに示したものである。第7週(105日目)から第34週(294日目)まではDT実験の実測値を使い、第42週以降はそれまでの実験経験から想定された中性子発生量(Projected neutron)を仮定したものである。第34週までの中性子の積算は 1×10^{20} n、またDT実験を終了する第91週(95年9月)までの積算についても 1×10^{20} nとし、従ってDT実験2年間での合計DT中性子発生量は 2×10^{20} nと当初の想定発生量の10%程度を相当した、より現実的な評価となっている。

得られた真空容器周辺での線量は図5.5、図5.6のようになる。図5.2の線量測定結果と γ 線検出器の測定地点に最も近い図5.5のR=5mの計算結果と比較すると、第7週(105日目)からIAEA'94直後の第41週(336日目)までの期間についてかなり一致した傾向を示している。この期間での最大値は、R=5mで実測値 ~ 100 mrem/hに対し計算値80 mrem/hである。図5.5の計算結果に基づけば、真空容器表面の最大線量は300 mrem/h、真空容器内部では1000 mrem/h程度となる。実験休止期間中の減衰の度合いが実測で大きめになっている原因については不明である。第42週以降のProjected neutronで仮定した評価した結果から、95年9月に2年間のDT実験(2×10^{20} n)を終了し、さらに1年経過した後の放射化レベルは真空容器内面で ~ 50 mrem/h、また4年後で ~ 10 mrem/hと推測される(図5.6、第144週付近)。

DT実験期間中の本体室は常時入室制限されているものの、やはり計測器など真空容器周辺でのメンテナンスのための入室が必要となる。このような作業者のためにES&H(Environment, Safety & Health)部門の人が数人、毎朝入室して決った測定点での線量当量を測り、この結果からその日の作業予定者1人1人の作業領域、作業時間を指導するといった個人被ばく管理を行っている。DT実験継続により今後一層の線量の増大が見込まれており、装置周辺へのアクセスはさらに厳しくなると思われる。また冒頭で述べたように高い放射線環境下での緊急時における対策法は今後の重要な課題である。

6. トリチウム処理

6.1 DT実験への対応状況

TFTRでは1982年の当初からDT実験を念頭においたトリチウム処理設備[6-1]を導入して、DT実験の開始に備えて来たが、その本領が発揮されるまでには10年以上の歳月を要したことになる。この間に何回となくDT実験が計画に挙がっては、その必要性や安全性の議論から延期が繰り返されてきた。しかし92年4月に開催された第1回トリチウムワークショップ以来、今までになく多くの米国内のトリチウム関係の研究者が結集して、一気に計画が進むことになった。この裏にはやはり91年11月のJETでのトリチウム0.2gを使った予備DT実験の成功が大きく影響したと考えられる。

92年12月にTSTA(Los Alamos National Lab.)からJ.AndersonがDivision Headとして招かれ、Tritium System Divisionが再編成された。これによりOperation Branch計15名の構成で、3名1組が12時間シフトで対応する完全連続運転体制が整った。翌年93年1月にはDOE

による使用前検査に当たる1000Ci試験のためのORR(Operation Readiness Review)[6-2]を開始した。この試験に合格した93年7月には11Ciのトリチウム漏れなど、若干のハード上のトラブル[6-3,6-4]を起こしたものの、こうした困難を速やかに処理し、93年11月12日より1000Ciを用いた初めてのトリチウム入射実験を開始した。TFTRは4基のNB Iを持ち、1基のNB Iに3台のイオン源があるので、合計12台のイオン源がある。この入射実験はイオン源1台から2%T,98%Dの混合ガスを使用して行なう(トリチウムトレース)実験であり、これによってトリチウム系や計測系の健全性確認を行なった。この放電はおよそ60ショット程行なわれた。このテスト結果を踏まえてさらに混合比を100%Tとした場合のORRを最終的にクリアした後、12月9日よりFull TによるDT実験を開始した。順次トリチウム入射イオン源の数を増やしてトリチウムの割合を増加させながら実験を進めた結果、翌10日には6.5MWのFusion powerを得る成果を得た。この大成功はちょうどその1年前から準備してきた一連のステップが実を結び、Full T実験に入ってからはその全てが首尾良く進んだことを物語っている。

このようにしてTFTRではDOEの厳しいインベントリ規制や計量管理を守りつつ、94年9月までの10カ月間に合計20gのトリチウムの処理(入射、回収)を円滑かつ安全に実施してDT実験を成功させ、プラズマ中でトリチウム混合比~50%の本格的なDT実験を実現した。DT実験の成功の鍵はトリチウム処理系の出来具合、言い換えればAndersonの努力にかかっていたと言っても決して大袈裟ではないと言える。この成果は94年のIAEAでAnderson自身から報告され[6-5]、高い評価を得たが、事前にPPPLで行われたDRY RUNでも、ほぼ連続して5000ショット以上の実験放電(実際にトリチウムを入射した放電は235ショット)を行ない得た自信のほどを示していた。さらに将来計画としてのTPS(Tritium Purification System)の現状紹介があり、ITERに先駆けてトカマク装置として世界で初めて組み込むことになるトリチウム燃料循環処理プラントへかける意気込みの大きさを示していた。

IAEAの後、2年の任期を終えたAndersonはTSTAへ戻り、その後任にはDeputyのP. LaMarcheが当たることとなった。ここ2年半余のトリチウム関係の主なイベントは以下のようなになる。

- | | | |
|-------|-----|---------------------------------------|
| 1992年 | 4月 | DT実験を目指したトリチウムワークショップ開催 |
| | 12月 | TSTAからJ.Anderson着任 |
| 1993年 | 1月 | DOEによる1000CiトリチウムORR開始 |
| | 7月 | 1000Ci-ORR終了 |
| | | 11Ciトリチウムリリース事故発生 |
| | 11月 | 2%トリチウムトレース実験開始 (11/12 First DT shot) |
| | 12月 | DOEによるFullトリチウムORR終了 |
| | | FullトリチウムDT実験開始(12/10 6.5MW達成) |
| | | トリチウム系バルブ故障で実験中断 |
| 1994年 | 2月 | FullDT実験再開 |
| | 5月 | 最大Fusion Power 9.3MW達成(5/27) |

カ月) から見ると過大評価となっている。一方、DT実験の実績に対応して最近行われた評価結果[5-4]を図5.4から図5.6までに示す。図5.4は表2.1で示したDT中性子発生量をグラフに示したものである。第7週(105日目)から第34週(294日目)まではDT実験の実測値を使い、第42週以降はそれまでの実験経験から想定された中性子発生量(Projected neutron)を仮定したものである。第34週までの中性子の積算は 1×10^{20} n、またDT実験を終了する第91週(95年9月)までの積算についても 1×10^{20} nとし、従ってDT実験2年間での合計DT中性子発生量は 2×10^{20} nと当初の想定発生量の10%程度を相当した、より現実的な評価となっている。

得られた真空容器周辺での線量は図5.5、図5.6のようになる。図5.2の線量測定結果と γ 線検出器の測定地点に最も近い図5.5のR=5mの計算結果と比較すると、第7週(105日目)からIAEA'94直後の第41週(336日目)までの期間についてかなり一致した傾向を示している。この期間での最大値は、R=5mで実測値 ~ 100 mrem/hに対し計算値80 mrem/hである。図5.5の計算結果に基づけば、真空容器表面の最大線量は300 mrem/h、真空容器内部では1000 mrem/h程度となる。実験休止期間中の減衰の度合いが実測で大きめになっている原因については不明である。第42週以降のProjected neutronで仮定した評価した結果から、95年9月に2年間のDT実験(2×10^{20} n)を終了し、さらに1年経過した後の放射化レベルは真空容器内面で ~ 50 mrem/h、また4年後で ~ 10 mrem/hと推測される(図5.6、第144週付近)。

DT実験期間中の本体室は常時入室制限されているものの、やはり計測器など真空容器周辺でのメンテナンスのための入室が必要となる。このような作業者のためにES&H(Environment, Safety & Health)部門の人が数人、毎朝入室して決った測定点での線量当量を測り、この結果からその日の作業予定者1人1人の作業領域、作業時間を指導するといった個人被ばく管理を行っている。DT実験継続により今後一層の線量の増大が見込まれており、装置周辺へのアクセスはさらに厳しくなると思われる。また冒頭で述べたように高い放射線環境下での緊急時における対策法は今後の重要な課題である。

6. トリチウム処理

6.1 DT実験への対応状況

TFTRでは1982年の当初からDT実験を念頭においたトリチウム処理設備[6-1]を導入して、DT実験の開始に備えて来たが、その本領が発揮されるまでには10年以上の歳月を要したことになる。この間に何回となくDT実験が計画に挙がっては、その必要性や安全性の議論から延期が繰り返されてきた。しかし92年4月に開催された第1回トリチウムワークショップ以来、今までになく多くの米国内のトリチウム関係の研究者が結集して、一気に計画が進むことになった。この裏にはやはり91年11月のJETでのトリチウム0.2gを使った予備DT実験の成功が大きく影響したと考えられる。

92年12月にTSTA(Los Alamos National Lab.)からJ.AndersonがDivision Headとして招かれ、Tritium System Divisionが再編成された。これによりOperation Branch計15名の構成で、3名1組が12時間シフトで対応する完全連続運転体制が整った。翌年93年1月にはDOE

による使用前検査に当たる1000Ci試験のためのORR(Operation Readiness Review)[6-2]を開始した。この試験に合格した93年7月には11Ciのトリチウム漏れなど、若干のハード上のトラブル[6-3,6-4]を起こしたものの、こうした困難を速やかに処理し、93年11月12日より1000Ciを用いた初めてのトリチウム入射実験を開始した。TFTRは4基のNB Iを持ち、1基のNB Iに3台のイオン源があるので、合計12台のイオン源がある。この入射実験はイオン源1台から2%T,98%Dの混合ガスを使用して行なう(トリチウムトレース)実験であり、これによってトリチウム系や計測系の健全性確認を行なった。この放電はおよそ60ショット程行なわれた。このテスト結果を踏まえてさらに混合比を100%Tとした場合のORRを最終的にクリアした後、12月9日よりFull TによるDT実験を開始した。順次トリチウム入射イオン源の数を増やしてトリチウムの割合を増加させながら実験を進めた結果、翌10日には6.5MWのFusion powerを得る成果を得た。この大成功はちょうどその1年前から準備してきた一連のステップが実を結び、Full T実験に入ってからはその全てが首尾良く進んだことを物語っている。

このようにしてTFTRではDOEの厳しいインベントリ規制や計量管理を守りつつ、94年9月までの10カ月間に合計20gのトリチウムの処理(入射、回収)を円滑かつ安全に実施してDT実験を成功させ、プラズマ中でトリチウム混合比~50%の本格的なDT実験を実現した。DT実験の成功の鍵はトリチウム処理系の出来具合、言い換えればAndersonの努力にかかっていたと言っても決して大袈裟ではないと言える。この成果は94年のIAEAでAnderson自身から報告され[6-5]、高い評価を得たが、事前にPPPLで行われたDRY RUNでも、ほぼ連続して5000ショット以上の実験放電(実際にトリチウムを入射した放電は235ショット)を行い得た自信のほどを示していた。さらに将来計画としてのTPS(Tritium Purification System)の現状紹介があり、ITERに先駆けてトカマク装置として世界で初めて組み込むことになるトリチウム燃料循環処理プラントへかける意気込みの大きさを示していた。

IAEAの後、2年の任期を終えたAndersonはTSTAへ戻り、その後任にはDeputyのP. LaMarcheが当たることとなった。ここ2年半余のトリチウム関係の主なイベントは以下のようになる。

- | | | |
|-------|-----|--|
| 1992年 | 4月 | DT実験を目指したトリチウムワークショップ開催 |
| | 12月 | TSTAからJ.Anderson着任 |
| 1993年 | 1月 | DOEによる1000CiトリチウムORR開始 |
| | 7月 | 1000Ci-ORR終了
11Ciトリチウムリリース事故発生 |
| | 11月 | 2%トリチウムトレース実験開始 (11/12 First DT shot) |
| | 12月 | DOEによるFullトリチウムORR終了
FullトリチウムDT実験開始(12/10 6.5MW達成)
トリチウム系バルブ故障で実験中断 |
| 1994年 | 2月 | FullDT実験再開 |
| | 5月 | 最大Fusion Power 9.3MW達成(5/27) |

- 6月 NBI-SF6ガス洩れ事故
- 8月 DT実験計画1年延長決定
- 10月 T P S 据え付け完了

第3章でも述べたように、TFTR施設そのものは最も安全な部類の原子力施設である、Low Hazard Category III Nuclear Facilityとしての指定を受けており[6-1]、この規定では本来30gまでのトリチウム使用が可能であるが、DT実験におけるサイトのトリチウム蓄積量はDOEによって施設内の全蓄積量5g以下、また安全上施設内の1箇所に2.5g以上溜めないと言った規制を受けている。この5gと言う限度値については科学的根拠はあまりなく、DOEが76年頃に大雑把に決めた値がそのまま今日まで残ったもので、単にpoliticalな決定に過ぎないようである。ただし、施設内の最大インベントリが真空容器で2g、NBIのクライオで1.8gと評価されていることと、1回に運べるトリチウム量が2.5g以下と言うことを考えると現状ではこれで特に問題ないようである。T P S 導入後もこの値を変えることなく計画が進められる。

6.2 トリチウムの搬入出[6-3]

トリチウムの搬入は低濃度輸送容器LP-50(1回2.5g以下)に入れ、Westinghouse Savannah River Siteから運び込み、分析後にウランベッドに貯蔵される。また、実験後の回収トリチウムの搬出はトリチウム水濃度により低濃度 Type A (0.1g以下)と高濃度 Type B (2.5g以下)の二つのタイプのMSB (Molecular Sieve Bed) 容器に分け、低濃度MSBはWestinghouse Hanfordに運んで廃棄保管、また高濃度MSBはトリチウムの再利用処理を行うためSavannah Riverに戻している。1回の搬入量2.5gの範囲で搬入した分、搬出を行なうことを繰り返し、真空容器内(～2g以下)を含めたサイトインベントリ全体が常に5g以下に保てるように厳密な計量管理が実施されている。これまでに運び込んだトリチウム量は計32gであり、実験週2週に1回の割合で運ばれている。1回の運搬量2.5gのトリチウムで行なえる典型的なDT放電は16ショット程度と少ないので、全てのマシン条件が最高の状態でDT放電を行なって最大の成果が得られるよう、1ショットのDT放電につきおよそ20ショットの調整用DD放電(加熱、計測系やプラズマ再現性の確認)を行なっている。

6.3 トリチウム処理設備

TFTRでのトリチウム処理設備の系統図を図6.1に示す。このような設備が本体室東側地下の240m²エリア内(Tritium Cleanup Area 8mx21m、Tritium Vault Area, 15mx15m)に設置されている。地下エリアにおける具体的な機器配置を図6.2に示した。

地下トリチウム処理設備は、搬入したトリチウムをウランベッドに格納するTSDGB (Tritium Storage and Delivery Glovebox) とトーラスから回収したトリチウムを含んだ排ガスを一旦溜めるタンクGHT (Gas Holding Tank, 7.6m³x2, 図6.2の10)、さらにこのガスを酸化触媒し、トリチウム水の形にしてMSBに吸着させて処理するTCS (Torus Cleanup System) などから主に構成される。

TFTR装置と地下エリアに設置されたトリチウム処理設備の鳥瞰図を図6.3に示す。トリチウムを吸蔵貯蔵したウランベッドを加熱して必要量のトリチウムを取り出し（～400℃、分離圧力1 atom）、これをTGDM(Tritium Gas Delivery Manifold)に送る。さらにここからTNB(Tritium Neutral Beam)やTGI(Tritium Gas Injector)に供給して放電を実施している。TSDGBからTGDMまではおよそ400Ft（～120m）の長さがあり、この間を結ぶトリチウム移送パイプは内側径1.6mm、外側13mmの細い2重管構造となっている。外側パイプ内は真空に引かれており、IC(イオンチェンバー)やQMS(Quadrupole Mass Spectrometer)により内部でのトリチウム漏れが監視されている[6-4]。インベントリを少なくするため、敢てこの細いパイプにしたことが、そのコンダクタンスの大きさから逆に計量管理上の難しさを与えている面もある。

地下エリアの設備については、将来的には年間70g以上のトリチウムを扱うことになる規模の施設としては、予想したよりかなり狭い空間にコンパクトに格納されている。JETのトリチウム処理設備（90g/年、現在調整中）が2階建のもっと大きな設備であるのと比較すると、意外に小さい感じを受ける。

6.4 安全対策

TFTRにおけるトリチウムの取り扱いエリアは図6.4に示すように、①TVA (Tritium Vault Area)、②本体室、③本体室地下エリア、④GHT Room、⑤TCR(Tritium Cleanup Room)、⑥Waste Handling Areaの6領域となる。6つのエリアはそれぞれ独立した空調換気系HVAC (Heating, Ventilating and Airconditioning System)が割当てられており、1つの部屋でトリチウム漏洩が生じてもダンパーの自動操作により他の部屋へ影響が及ばないようにになっている。空気中濃度はエリア毎にIC($1\mu\text{Ci}/\text{m}^3 \sim 10\text{Ci}/\text{m}^3$)でモニターされている。空気中トリチウム濃度の検出限界 $\sim 0.5\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ に対し、事故時の濃度警報は以下の3段階に応じて発令され、それぞれに対応した処置や退避の仕方が決められている。

- | | |
|------------------|---|
| ①Caution level | $20\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ($7.4 \times 10^{-1}\text{Bq}/\text{cm}^3$) |
| ②High level | $100\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ($3.7\text{Bq}/\text{cm}^3$) |
| ③High-high level | $100\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ ($3.7 \times 10^1\text{Bq}/\text{cm}^3$) |

JT-60Uでは放射線障害防止法により、作業エリアではこの①に相当する $7 \times 10^1\text{Bq}/\text{cm}^3$ 以下とするように義務づけられている。原研TPLでは①より低い $\sim 2\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ で設備インターロックが機能するようになっており、日本の方が基準としては厳しくなっている。TFTR施設のトリチウムモニターはこうしたRoom Monitor 11ヶ所の他に、Stack Monitor 8ヶ所、Glovebox Monitor 3ヶ所に設置されている。

高レベルの汚染が予想される地下エリア(Hot Area)でのトリチウム散逸・漏洩に対する安全設備は3次系で構成されており、1次系は貯蔵用ウランベッドそのもの、2次系は供給系Glove Box (TSDGB)内のArgonガスの循環と漏洩トリチウムの回収処理を担うTSDCS (Tritium Storage and Delivery Cleanup System)、3次系はTVAやTCR室内へ漏洩したトリチウムを回収処理するTVCS (Tritium Vault Cleanup System)となる。一方、本体室のクリーンアップは空調系HVACの除湿に任せられているだけである。これは本体室内のトリチウムが真空容器やNBIといった高真空度に排気された機器内に閉じ込められて

いること、例え漏れたとしても本体室内の容量が大きいので濃度的には低くなること、などによるものである。すなわちこの施設自体が³Low hazard nuclear facilityということもあり、DT実験でのリスクが極めて少ないとの判断から、本体建家については特に多重防護的な安全対策は適用されなかったようである。図6.5にはトリチウムを回収処理するTCS, TSDCS, TVCSのような設備 (Tritium Cleanup System)内の一般的な基本構成を示した。クリーンアップの方式は単純であり、トリチウムガスを一旦酸化触媒器(Catalytic Recombiner)で水に転換し、これをMSBに吸着除去するだけのものである。

6.5 真空容器内インベントリとCleanup

TFTRでの系内トリチウムインベントリはTSGDBとGHTでの計量結果の差から評価される。GHTのトリチウムは特に高濃度であるため、数千Ci/m³までの高濃度まで測定可能なように設計されたIC(Femto-TechTM model type 254PP)が使用されている。ICの出力はキャリアガスの種類(D or Nなど)で変わるので、同時にQMS分析を行なってガス成分に対する補正をしている。DT実験初期においてはGHTでの回収結果が供給を上回るといったカウントミスがあったようであるが、その後はICの較正精度を向上させることでこうした問題はクリアされている。

今回の10カ月間のDT実験での系内トリチウムフローは図6.6のようになる[6-5]。NBI入射した19.6gのうちトーラスに入った分は0.74gと入射分の4%程度であり、残りの大半はクライオポンプを通して捨てられる[6-4,6-6]。こうした割合はJETのPTEの時[1-1]とほとんど同様であった。計量管理上、真空容器には0.6gが残っている勘定になるが、真空容器内のトリチウムを追い出して残留量を測定するCleanup実験がほとんど行われていないのでその値の確認はできていない。93年の12月におよそ半日程度の重水素放電を行なって真空容器内から回収された若干量のトリチウム量(NBIのクライオを再生して得られたもの)についての報告[6-7]があるが、系内インベントリについての正確な評価はまだ不明である。

数年間にわたる重水素実験で発生したトリチウムのおよそ45%が真空容器内に残ったTFTRの結果[6-8]や、同じ重水素実験で70-80%が残ったJT-60Uの結果[6-9]などと比較して、本格的なDT実験でのトリチウムインベントリの結果の行方は興味あるところである。JETの予備DT実験では0.2gのトリチウムを使用し、1MW以上のFusion powerを得たDT放電が2ショットのみであったが、その後2か月強のCleanup実験でほとんどのトリチウムが回収できている[1-1]。一方、2年に渡っておそらく100gを超えるトリチウムを使用することになるTFTRではどのような評価が得られるであろうか。

6.6 TPS設備

TFTRではDT実験が延長されたこともあり、今後トリチウム処理量は増大することになるが、トリチウムの搬入出を繰り返すといった現状のワンスルー方式ではサイト保有量、廃棄物などの点で限界がある。これを解決するためのOn-site処理の手段として、TPS(Tritium Purification System)設備を94年10月に導入して現在調整・試験をおこなっている。TPSは深冷蒸留方式4塔を用いた同位体分離によるトリチウム燃料循環サイク

ルであり、95年の5月末から予定しているTPSの運転開始後は年間70 g以上のトリチウム処理がOn-siteで可能となる。これによりトリチウムの搬入出量は現状のおよそ5%にまで低減できるものと考えられている。

図6.7にTPSを導入後のTFTRトリチウム処理系統図を示す。TPS装置はFTS(Feed Treatment System)及びISS (Isotopic Separation System) 部分で構成される。FTSはPalladium Diffuser (パラジウム拡散器) を用いた水素同位体ガス精製供給処理システムであり、トラスからの排ガスをパラジウム合金膜を透過させることによって同位体ガス以外の不純物ガスを除去する。不純物ガスはTCSへ戻し、同位体ガスはISSへ送られる。ISSは4塔のCD(Cryo Distillation、深冷蒸留塔) ColumnとEQ(Equilibrator、同位体平衡器)で構成される。CD1でTを含んだガスからHを分離する。分離された同位体はCDの上下両端より排出される(上:H,下:T,D)。EQ1,EQ2はHT,HDの変換を行なう。CD2,CD3はD₂の分離を行なう(CD2 \leftrightarrow CD3循環する)。EQ3はHTの変換を行なってCD3のD₂純度を向上させる。EQ4はDTをD,Tに分離し、最終的にCD4でTを分離することにより99.9%の高純度Tの生成が可能となる。回収したトリチウムはトリチウム貯蔵設備TSDGBに戻して再利用されることになる。これらの設備はCFFTP(CANADA FUSION FUEL TEST PROJECT)の設計でOntario Hydro社が製作した。当初、ISSは深冷蒸留方式5塔、FTSはウランベッド方式で設計が進められてきたが、5gのサイトインベントリの観点からそれぞれ最終的に4塔、PdAg拡散膜方式へと変更された。TPS自身のインベントリは全体で0.75gと見込まれている(設計目標は1g以下)。

TPSについては当初図6.1の15に示されるように地下Tritium Vault Areaに設置される予定であったが、93年8月のDT実験の1年延期の決定を受けて設定場所を急遽Hot Cell南西側一階のTPSエリアに変更した。TFTRはDT実験終了後にDecontamination and Decommissioning Phaseに入るが、こうした時期においても継続して単独での試験運転が可能ないように、できるだけTPSを本体室エリアから離しておきたいとの判断があったようである。94年10月中旬にFTS及びEQ部分の導入が行なわれたので、その状況を視察した。FTS及びEQ部分は別々に現地搬入後、現場で1つのユニットに組立てられた(写真6.1、写真6.2参照、上ユニットがEQ,下ユニットがFTS)。FTSには2つのPalladium Diffuserタンクが組み込まれているのがわかる。その後1体となったユニットをTPSエリアに移動して、すでに搬入が済んでいたCDユニットの左脇に設置して据付を終了した。写真6.3に組立完了後のTPS全景を示す。CD塔の高さは2.5mである。据付後より調整作業を開始した。

6.7 問題点と今後の課題

TFTRでは93年のDT実験の開始に先立ち、11Ciのトリチウムリリース事故[6-3,6-4]やバルブ故障によって当初の計画が大幅に遅れる結果となった。こうした単純な故障や操作ミス他に、NBIの1イオン源の高圧絶縁用SF₆ガスが洩れてTCSの機能を劣化させるトラブル[6-5]があった。いくつかのトラブルをまとめてみた。

(1) トリチウムリリース

93年7月のトレース実験許可の当日、TSGDBとGHTとのトリチウム計量が合わな

め、ポンプオイルとのトリチウム置換の可能性を調査するためにオイルのサンプリングを行なおうとした。この作業中に誤ってポンプ出口側のラインに残留していたトリチウムガスを作業室内に放出し、さらにこのガスはオイル交換用の換気系を通してスタックへ排出されてアラームが作動した（作業室検出濃度 $400 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ 、スタック $10\text{mCi}/\text{m}^3$ ）。これに伴い緊急遮断弁が閉じて作業室が隔離され、緊急除去系が作動、作業域からの緊急退避命令がかかった。結局トリチウムリリース量は 11Ci と、年間放出許容値 500Ci に比較して安全上問題となる量ではなかったが、原因調査のためトレース実験は11月まで延期された。こうした事故の原因は、オイルポンプを使用していること、ライン確認ミスによる弁の誤操作があったこと、オイル交換時の排気を一時的に直接換気系に流していたことなど、設備上の不備や人為ミスが重なったものであった。この事故の引き金となった計量誤差の発生原因そのものはその後の調査の結果、GHTのイオンチェンバーの不具合にあったとのことである。

(2) SF₆ガス漏れ

94年6月にNBIの1イオン源の高圧絶縁用のSF₆ガスが洩れてTCSに送られた。SF₆ガスは本来不活性であるが、本体から来る他のガスと混ぜ合った状態で高温状態（ $\sim 750\text{K}$ ）にある酸化触媒器内のプラチナ、パラジウムを通過した。この際、反応（熱分解）を起こして腐食性ガス（Hydrogen fluoride）が形成された結果、このガスが酸化触媒器を痛めてトラップ効率を著しく低下させたものである。モレキュラーシーブベッド（13 Type Zeolite）は常温でSF₆ガスを吸収するので、ある程度の回収はできたが、残りのガスの除去には時間がかかり、事故の発生から回復まで数週間を要することとなった。

(3) 今後の課題

上の(1)はトリチウム測定用のICが発端となった事故であった。僅かでもICの読みにくるいがあると正確なインベントリ評価ができないばかりでなく、サイトインベントリが 5g を超えた時点で直ちに実験を中止しなければならない。TFTRにとってトリチウムの計量精度の確保は厳しい問題であり、今後この計量誤差（Inventory difference）をいかに少なくして行くかが課題となっている。これまでの結果ではGHTでの測定上の誤差は 3.5% であり、これはDOEの要求する計量精度は満たすもののインベントリを正確に評価するにはまだ不十分である。

(2)の問題はNBI装置に起因して起こった初めての事例である。今後はトリチウム自身ばかりでなく、トリチウム処理機器に危害を及ぼすSF₆ガスのような媒体に対しても漏洩防止対策を施していく必要がある。この他にNBI装置に関連した大きな問題としては、第4章でも述べたようにトリチウムロスがある。特に大量のトリチウムを使用するDT実験では、施設から排出されるトリチウムロスの割合がサイト周辺での線量値を決定してしまうことから、この値をできるだけ抑えることが必要となる。今後さらに大量のトリチウムを扱うことを考えると、ほとんどのトリチウムが真空容器に入らずに手前のクライオで取り除かれてしまい、いたずらに系内インベントリを増やしているだけのNBIによる入射方法については、今後の検討が必要となろう。高圧ガスを使用することで多量のトリチウムが排気系に混入する可能性のあるpneumatic方式でない、遠心分離式ペレットなどへの切り替えなどはその候補と考えられる。

7. DT実験後のDecommissioningについて

TFTRでは1995年9月のDT実験終了後からD&D(Decontamination and Decommissioning、除染解体)作業を開始する(図7.1)。最近D&Dを担当する部門はS&R(Shutdown and Removal)と名称を変更した。シャットダウン後の4か月間程は真空容器内に滞留したトリチウム除去を行う。その後放射化した装置のクールダウンを行いつつ、全体で3年程の時間をかけて放射化の少ない部分から解体して行く予定である。現在の計画では99年始め頃にTPX装置が本体室内に新たに設置される予定である。

表7.1に示すように、シャットダウン1年後の装置主要構造物の予想放射化レベルは、真空容器ポート部で800 mrem/h、トロイダル磁場コイル外側表面で70 mrem/hである(2×10^{21} 個のDT中性子の発生を仮定)[1-8]。放射化核種はステンレス、インコネルなどに生ずる ^{54}Mn 、 ^{58}Co および ^{60}Co である。

放射化した真空容器内部の解体にはTFTR用に開発した自動制御式メンテナンス・マニピュレータ・アーム(MMA)が使用される予定である。TFTR解体に伴って発生する放射化廃棄物は総量で2500トン、総放射化量は50 TBq(1400Ci)と見積られている(表7.2)。解体によって発生した廃棄物は梱包後に300個以上の廃棄物用コンテナ分けて収納し、100台以上のトラックでDOE Hanford site (Richland, Washington)のLow level radio active waste (LLRW) siteに運搬して廃棄処分されることになっている。

表7.1に示した真空容器のシャットダウン後の予想放射化レベルが、5.3章で述べた放射化計算評価レベル(~ 50 mrem/h)より1桁大きいのはDT中性子発生量の差によるものである。従って実際の放射化レベルは表7.1や表7.2のおよそ10%程度になるものと予想される。

8. おわりに

以上TFTRのDT実験における放射線安全に係る対応状況について述べた。DT放電を行えば、本体室内にはまず人が入れないだろうと思いついでいた筆者の予想に反して、実際には被ばく管理に留意しつつもメンテナンスのための入室を毎日実施しているのには驚かされた。宿命的に複雑な構造を持つ核融合装置において人の手による作業をゼロにすることはやはり不可能なことなのだろうか。核融合の研究が進み、その成果が進展すればするほど放射線安全の確保という現実の問題との厳しい対応を迫られてゆくことを今回の実験を通して実感した。また最新技術を投入したTPSを含むトリチウム処理施設をつぶさに見ることができたのも貴重な体験であった。TFTRで実際に蓄積されつつあるDT実験の貴重な経験と知識は、今後の核融合炉の安全設計や低放射化設計により具体的かつ実戦的なデータを提供していくことになるだろう。

最後にDT実験参加の機会を与えて下さいましたPPPLのK.McGuire博士に深謝いたします。PPPL滞在中、放射線安全に関する多くの議論と情報の提供を頂き、また本稿をまとめるに当たりデータの利用を快く許可して頂きましたPPPL Tokamak Operation Division

7. DT実験後のDecommissioningについて

TFTRでは1995年9月のDT実験終了後からD&D(Decontamination and Decommissioning、除染解体)作業を開始する(図7.1)。最近D&Dを担当する部門はS&R(Shutdown and Removal)と名称を変更した。シャットダウン後の4か月間程は真空容器内に滞留したトリチウム除去を行う。その後放射化した装置のクールダウンを行いつつ、全体で3年程の時間をかけて放射化の少ない部分から解体して行く予定である。現在の計画では99年始め頃にTPX装置が本体室内に新たに設置される予定である。

表7.1に示すように、シャットダウン1年後の装置主要構造物の予想放射化レベルは、真空容器ポート部で800 mrem/h、トロイダル磁場コイル外側表面で70 mrem/hである(2×10^{21} 個のDT中性子の発生を仮定)[1-8]。放射化核種はステンレス、インコネルなどに生ずる ^{54}Mn 、 ^{58}Co および ^{60}Co である。

放射化した真空容器内部の解体にはTFTR用に開発した自動制御式メンテナンス・マニピュレータ・アーム(MMA)が使用される予定である。TFTR解体に伴って発生する放射化廃棄物は総量で2500トン、総放射化量は50 TBq(1400Ci)と見積られている(表7.2)。解体によって発生した廃棄物は梱包後に300個以上の廃棄物用コンテナ分けて収納し、100台以上のトラックでDOE Hanford site (Richland, Washington)のLow level radio active waste (LLRW) siteに運搬して廃棄処分されることになっている。

表7.1に示した真空容器のシャットダウン後の予想放射化レベルが、5.3章で述べた放射化計算評価レベル(~ 50 mrem/h)より1桁大きいのはDT中性子発生量の差によるものである。従って実際の放射化レベルは表7.1や表7.2のおよそ10%程度になるものと予想される。

8. おわりに

以上TFTRのDT実験における放射線安全に係る対応状況について述べた。DT放電を行えば、本体室内にはまず人が入れないだろうと思いついでいた筆者の予想に反して、実際には被ばく管理に留意しつつもメンテナンスのための入室を毎日実施しているのには驚かされた。宿命的に複雑な構造を持つ核融合装置において人の手による作業をゼロにすることはやはり不可能なことなのだろうか。核融合の研究が進み、その成果が進展すればするほど放射線安全の確保という現実の問題との厳しい対応を迫られてゆくことを今回の実験を通して実感した。また最新技術を投入したTPSを含むトリチウム処理施設をつぶさに見ることができたのも貴重な体験であった。TFTRで実際に蓄積されつつあるDT実験の貴重な経験と知識は、今後の核融合炉の安全設計や低放射化設計により具体的かつ実戦的なデータを提供していくことになるだろう。

最後にDT実験参加の機会を与えて下さいましたPPPLのK.McGuire博士に深謝いたします。PPPL滞在中、放射線安全に関する多くの議論と情報の提供を頂き、また本稿をまとめるに当たりデータの利用を快く許可して頂きましたPPPL Tokamak Operation Division

のH. Kugel博士に心から感謝いたします。TPS Branch HeadのL.Dudeck氏を初め、トリチウム処理設備の調査に関してお世話になりました多くの関係者の方々に御礼申し上げます。また93年7月当時起きたトリチウム処理系のトラブルの詳細については原研TPL林巧氏からの提供資料等を参照させて頂きました。御礼申し上げます。

参考文献

- [1-1] JET Team, Nucl. Fusion 32, 187(1992).
- [1-2] Hawryluk, R.J., et al, Physics of Plasma 1(1994).
- [1-3] Hosea, J., et al., Deuterium-Tritium Experiments on the Tokamak Fusion Test Reactor, 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)389.
- [1-4] Strachan, J., D., et al., Initial D-T results on TFTR, 21th European Physics Meeting, Plasma Physics Division(Montpellier, France, June 27-July 1, 1994).
- [1-5] Meade, D.M, TFTR Experience with D-T Operation (Proc. 3rd Internat. Symp. on Fusion Nucl. Technol., Los Angeles, 1994).
- [1-6] Meade, D.M., et al., 18th Symposium on Fusion Technology , SOFT Conference (Karlsruhe, Germany, Aug.22-26,1994)
- [1-7] Hawryluk, R.J., et al, Proc. 15th Intl. Conf, Plasma Physics Contr. Nucl, Fusion Research, IAEA-CN-60/A-1-I-1, Seville, Sept, 1994.
- [1-8] PPPL OPR-R-12, D-T PLAN(May, 1993)
- [3-1] DeLooper, J., et al., 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)1051.
- [3-2] DOE ORDER 5480.11 12/88, Radiation Protection for Occupational Workers.
- [3-3] PPPL Health and Safety Manual HSD-5008 Sec. 10, Radiation Safety 12/90.
- [4-1] Kugel, H., et al., 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)963.
- [4-2] Kugel, H., et al., Measurements of TFTR D-T Radiation Shielding Efficiency (Proc. 3rd Internat. Symp. on Fusion Nucl. Technol., Los Angeles, 1994).
- [4-3] Ku, L.P., et al., Radiation Shielding for TFTR DT Diagnostics, 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)933.
- [5-1] Kugel, H., Poster 36th APS Div. of Plasma Physics, Poster 6R30,7-11, Nov. Minneapolis, MN, Bull. APS, 39, No.7, 1682(1994).
- [5-2] Miya, N. et al., One-Dimensional Activation Analysis of Vacuum Vessel of JT-60U with Deuterium Gas Discharges, J. of Nucl. Science and Technol., 31[5]398 (1994).

のH. Kugel博士に心から感謝いたします。TPS Branch HeadのL.Dudeck氏を初め、トリチウム処理設備の調査に関してお世話になりました多くの関係者の方々に御礼申しあげます。また93年7月当時起きたトリチウム処理系のトラブルの詳細については原研TPL林巧氏からの提供資料等を参照させて頂きました。御礼申し上げます。

参考文献

- [1-1] JET Team, Nucl. Fusion 32, 187(1992).
- [1-2] Hawryluk, R.J., et al, Physics of Plasma 1(1994).
- [1-3] Hosea, J., et al., Deuterium-Tritium Experiments on the Tokamak Fusion Test Reactor, 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)389.
- [1-4] Strachan, J., D., et al., Initial D-T results on TFTR, 21th European Physics Meeting, Plasma Physics Division(Montpellier, France, June 27-July 1, 1994).
- [1-5] Meade, D.M, TFTR Experience with D-T Operation (Proc. 3rd Internat. Symp. on Fusion Nucl. Technol., Los Angeles, 1994).
- [1-6] Meade, D.M., et al., 18th Symposium on Fusion Technology , SOFT Conference (Karlsruhe, Germany, Aug.22-26,1994)
- [1-7] Hawryluk, R.J., et al, Proc. 15th Intl. Conf, Plasma Physics Contr. Nucl, Fusion Research, IAEA-CN-60/A-1-I-1, Seville, Sept, 1994.
- [1-8] PPPL OPR-R-12, D-T PLAN(May, 1993)
- [3-1] DeLooper, J., et al., 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)1051.
- [3-2] DOE ORDER 5480.11 12/88, Radiation Protection for Occupational Workers.
- [3-3] PPPL Health and Safety Manual HSD-5008 Sec. 10, Radiation Safety 12/90.
- [4-1] Kugel, H., et al., 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)963.
- [4-2] Kugel, H., et al., Measurements of TFTR D-T Radiation Shielding Efficiency (Proc. 3rd Internat. Symp. on Fusion Nucl. Technol., Los Angeles, 1994).
- [4-3] Ku, L.P., et al., Radiation Shielding for TFTR DT Diagnostics, 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994) , Fusion Technology, 26(1994)933.
- [5-1] Kugel, H., Poster 36th APS Div. of Plasma Physics, Poster 6R30,7-11, Nov. Minneapolis, MN, Bull. APS, 39, No.7, 1682(1994).
- [5-2] Miya, N. et al., One-Dimensional Activation Analysis of Vacuum Vessel of JT-60U with Deuterium Gas Discharges, J. of Nucl. Science and Technol., 31[5]398 (1994).

- [5-3] Ku, L.P. and S. L. Liew, Global Dose Rate in TFTR Due to Neutron Induced Residual Radioactivities During DT Operation, Proc. 15th IEEE Symp. on Fusion Engineering (1993), Vol.1, 313.
- [5-4] Kugel, H., TFTR Neutron Activation, Private Communication.
- [6-1] Sissingh, R. A. P. and Rossmassler, R.L., Tritium Facility at TFTR, Fus. Eng. and Design, 12(1990)383.
- [6-2] Anderson, J.L., et al., Initial Testing of the Tritium Systems at the Tokamak Fusion Test Reactor, Proc. 15th IEEE Symp. on Fusion Engineering (1993), Vol.1, 208.
- [6-3] Anderson, J.L., et al., Operation of the TFTR tritium systems during initial tritium experiments(Proc. 3rd Internat. Symp. on Fusion Nucl. Technol., Los Angeles, 1994) to be published.
- [6-4] Vonhalle, A., et al., The Tritium Operations Experience on TFTR, 18th Symposium on Fusion Technology , SOFT Conference(Karlsruhe, Germany, Aug.22-26,1994).
- [6-5] Anderson,J.L., et al.,Proc. 15th Intl. Conf, Plasma Physics Contr. Nucl, Fusion Research, IAEA-CN-60/F-2-II-1, Seville, Sept, 1994.
- [6-6] LaMarche,P.,et al., Tritium Processing and Management During D-T Experiments on TFTR, 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy(New Orleans, June 19-23, 1994), Fusion Technology, 26(1994)427.
- [6-7] Caorlin, M., et al.,A Tritium Vessel Cleanup Experiment in TFTR, 21th European Physics Meeting, Plasma Physics Division(Montpellier, France, June 27-July 1,1994).
- [6-8] Dylla,H.F., et al. : P.P.L. and Sandia Rep., PPPL -2523/SAND 88 -8212 (1988).
- [6-9] Miya,N., et al.: proc. 11th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (New Orleans, June 19-23, 1994), Fusion Technol., 26,[3],(1994)507.

表 2-1 TFTR-DT 実験の経緯と中性子発生量 (1993.11 より 1994.10 まで)

Week No.	通算日	実験週	Shot No.	DT中性子量	コメント
-7	7	1993. 11/12のみ	72583 - 72648	↑ 1993 年のDT 中性子発生量 Total 1.7e19 n ↓	# 72163でFirst D-T shot. T~2%
-6	14	11/15 - 11/18	72652 - 72871		
-5	21	11/22 - 11/23	72826 - 72957		
-4	28	12/1 - 12/3	72962 - 73096		
-3	35	12/6, 12/8-10	73102 - 73274		# 73268で~6.5MW(12/10)
-2	42	12/13 - 12/17	73280 - 73488		
-1	49	12/20th	なし	—	●トリチウム系トラブル発生
0	56	12/27th	なし	—	
1	63	1994. 1/3rd	なし	—	
2	70	1/10th	なし	—	
3	77	1/17th	なし	—	(継続)
4	84	1/24th	なし	—	トリチウム系トラブル発生 (バルブ故障、TCSリーク) 修復
5	91	2/3 - 2/4	73509 - 73688	0	●実験再開
6	98	2/7 - 2/10	73689 - 73872	0	
7	105	2/14 - 2/18	73880 - 74181	0	ICRF Scanなど
8	112	2/21 - 2/25	74186 - 74408	0	
9	119	2/28 - 3/4	74413 - 74597	9.54 e18	DT実験再開
10	126	3/7 - 3/11	74602 - 74919	1.15 e19	
11	133	3/19th	なし	—	
12	140	3/21 - 3/25	74929 - 75194	0	
13	147	3/28 - 4/1	75170 - 75464	0	
14	154	4/4th	なし	—	
15	161	4/12 - 4/15	75485 - 75715	0	
16	168	4/20 - 4/22	75716 - 75863	0	
17	175	4/27 - 4/29	75866 - 76023	4.68 e18	

表2-1 (つづき)

Week No.	通算日	実験週	Shot No.	DT中性子量	コメント
18	182	5/2 - 5/6	76029 - 76319	5.19 e18	
19	189	5/9th	なし	—	
20	196	5/16 - 5/19	76347 - 76607	1.48 e19	
21	203	5/23 - 5/27	76613 - 76778	1.19 e19	#76778で~9.3MW(5/27)
22	210	6/2 - 6/3	76794 - 77092	0	
23	217	6/6 - 6/10	77185 - 77486	1.06 e19	
24	224	6/13th	なし	—	●NBI SF6トラブル発生
25	231	6/20th	なし	—	ANS
26	238	6/27th	なし	—	EPS, ISFNT-3
27	245	7/6 - 7/8	77506 - 77653	0	修復
28	252	7/11 - 7/15	77657 - 77939	3.37 e18	
29	259	7/18 - 7/22	77945 - 78250	9.66 e18	
30	266	7/25th	なし	—	
31	273	8/4 - 8/5	78274 - 78389	3.05 e18	
32	280	8/8 - 8/10	78393 - 78720	8.14 e18	
33	287	8/17 - 8/19	78809 - 79102	5.88 e18	
34	294	8/22 - 8/26	79106 - 79392	1.01 e19	SOFT
35	301	8/29th	なし	—	
36	308	9/6 - 9/7	79398 - 79462	0	●9/7にV/Vエアリーク発生
37	315	9/12th	なし	—	
38	322	9/19th	なし	—	
39	329	9/26th	なし	—	IAEA '94
40	336	10/3rd	なし	—	TPS据付完了(10/13)
41	343	10/10th	なし	—	10/16週にエアリーク修復
42					1994年のDT中性子発生量 Total 1.08e20 n

表4-1 DT実験が敷地境界 (NE) 地点に及ぼす年間線量当量 (1×10^{21} n のDT中性子を仮定)

Radiation Path	mrem/neutron	Total CY 1993	Total CY 1994 (est.)
D-D neutron yield		$7.2 \pm 0.7 \text{ E}18$	$1 \text{ E}19 \text{ (est.)}$
D-T neutron yield		$1.65 \pm 0.1 \text{ E}19$	$1 \text{ E}21 \text{ (est.)}$
Direct n-mrem from D-D neutrons	$<1.5 \text{ E-}22$	$<1 \text{ E-}3 \text{ mrem}$	$<1.5 \text{ E-}3 \text{ mrem}$
Direct g-mrem from D-D neutron	$<4.1 \pm 2.7 \text{ E-}22$	$3.0 \pm 1.9 \text{ E-}3 \text{ mrem}$	$4.1 \pm 2.7 \text{ E-}3 \text{ mrem}$
Direct n-mrem from D-T neutrons	$1.9 \pm 0.4 \text{ E-}22$	$3.1 \pm 0.7 \text{ E-}3 \text{ mrem}$	$0.19 \pm 0.04 \text{ mrem}$
Direct g-mrem from D-T neutrons	$1.3 \pm 0.2 \text{ E-}22$	$2.1 \pm 0.3 \text{ E-}3 \text{ mrem}$	$0.13 \pm 0.02 \text{ mrem}$
Air Activated by D-D neutrons	$3.4 \text{ E-}22$	$2.4 \text{ E-}3 \text{ mrem}$	$3.4 \text{ E-}3 \text{ mrem}$
Air Activated by D-T neutrons	$7.3 \text{ E-}22$	$1.2 \text{ E-}2 \text{ mrem}$	0.73 mrem
Liquid Nitrogen Activated by D-T neutrons	$2.0 \text{ E-}23$	$3.3 \text{ E-}4 \text{ mrem}$	0.02 mrem
Normal Tritium Loss CY 1993 CY1994 (est.)	$2.6 \text{ E-}3 \text{ mrem/Ci}$ $<50 \text{ Ci}$ $<500 \text{ Ci}$	$<0.13 \text{ mrem}$	$<1.3 \text{ mrem}$
Annual Property Line Dose-Equivalent		$<0.15 \text{ mrem}$	$<2.4 \text{ mrem}$

表4-2 DT実験で発生する放射化気体が敷地境界 (NE) 地点に及ぼす年間線量当量
(1×10^{21} nのDT中性子を仮定)

Isotope	Half-life	Test Cell Activity (Ci) released per $1E21$ D-T n	Dose-equivalent at property line (mrem)
^{13}N	10 min	63	0.18
^{41}Ar	1.8 hr	85	0.34
^{16}N	7.1 sec	74	0.005
^{40}Cl	80.6 sec	11	0.09
^{37}S	5 min	10	0.11
Total			0.73

表7.1 DT実験終了後のTFTR放射化予測レベル (2×10^{21} D-T中性子の発生を仮定, 文献[1-8]より)

Cooling Time	Vacuum Vessel Port Cover	Outboard side of TF Coil Case	Outboard of Support Column
	$\mu\text{Sv/hr}$	$\mu\text{Sv/hr}$	$\mu\text{Sv/hr}$
6 mos.	2E4	1.6E3	60
1 yr.	8E3	700	20
2 yr.	2.6E3	240	6
5 yr.	800	40	1

表7.2 DT実験終了後の放射性廃棄物量 (Low level waste) 予測 (文献 [1-8] より)

Low Level Waste	No. of Waste Containers	Volume (ft. ³)
Cryogenics System	8 (30)	720
Neutral Beam Lines	72 (272)	6,480
Torus Vacuum Pumping System & Residual Gas Analyzer	26 (98)	2,340
Diagnostics	64 (242)	5,760
Tritium Pellet Injector	4 (15)	360
Lithium Pellet Injector	3 (11)	270
Diborane Gas Delivery System	2 (7.6)	180
Machine Area Water Systems	10 (38)	900
ICRF	6 (23)	540
Umbrella Structure & Upper PF Coils	21 (79)	1,890
Vertical Columns & Lintels	19 (72)	1,710
Misc. VV Components	4 (15)	360
TF Coils & Vacuum Vessel	70 (265)	6,300
Lower PF Coils	9 (34)	810
Center Column & Inner Support Structure & Inner PF Coils	8 (30)	720
Final Decon & Clean-up	NA (168)	4,000
Total Cu. Ft.		33,340cf
Total Containers (Curies)	326 (1400Ci)	
Avarage Wt = 150lbs/cf		5,001,000lbs (2,501Tons)

平均誘導放射能
~1.5Ci/m³

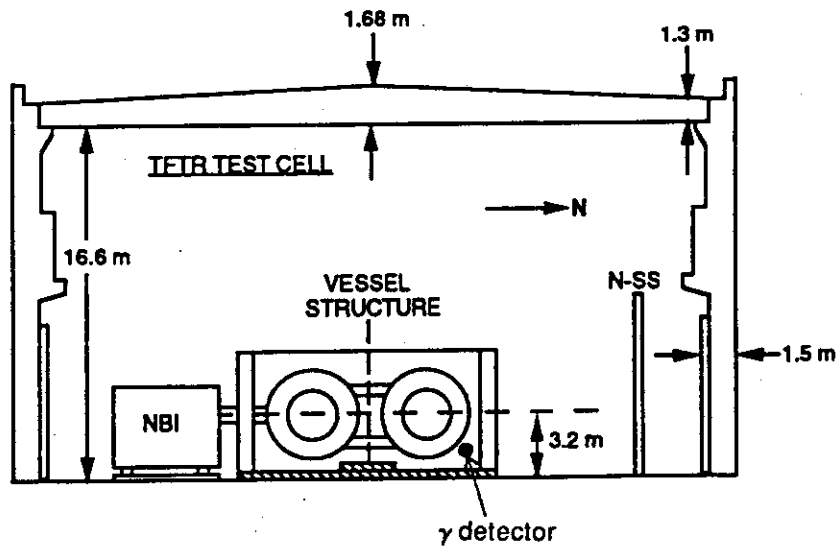
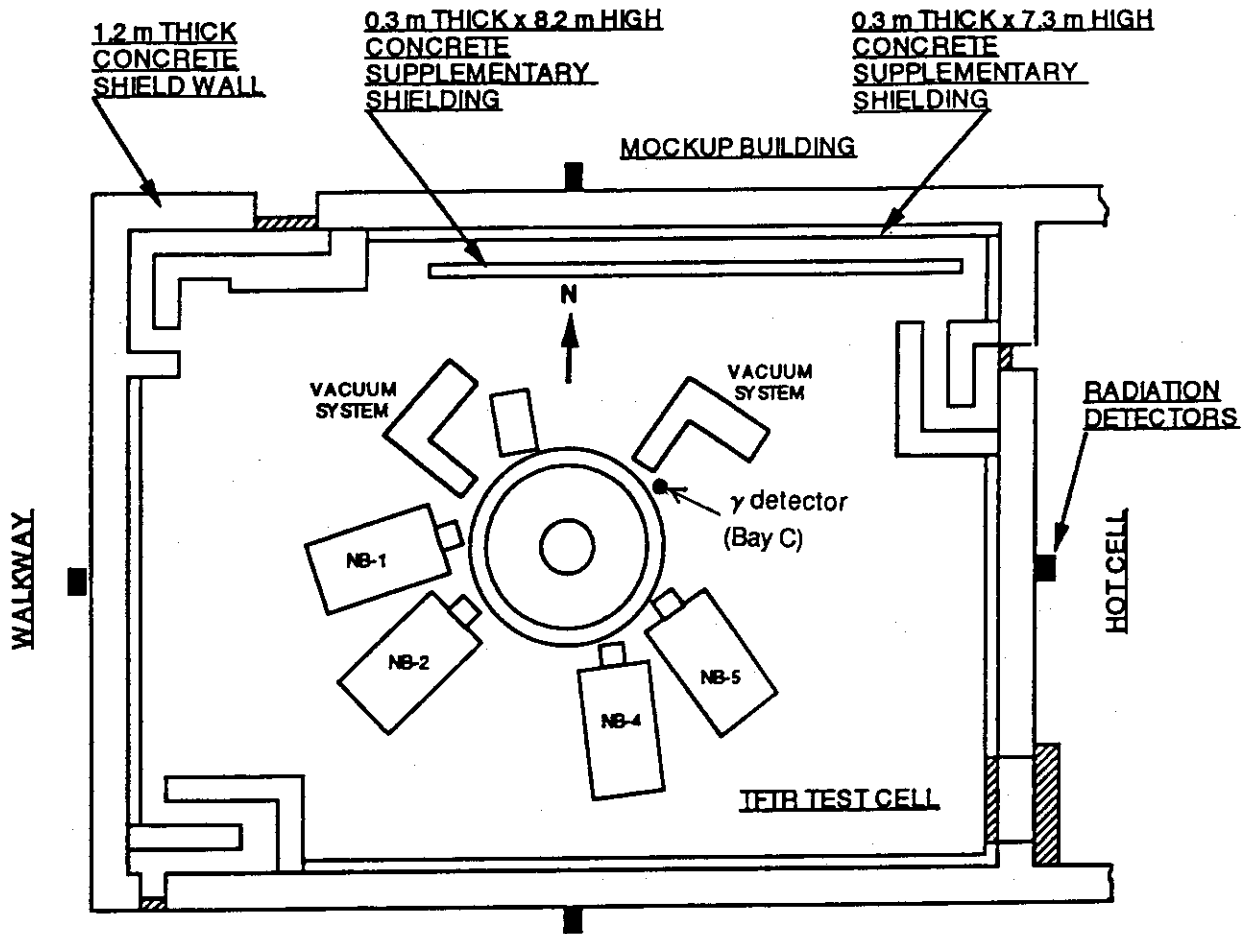


図 4.1 TFTR 本体室 (Test Cell) 内の遮蔽概要図

PPPL#93X0091

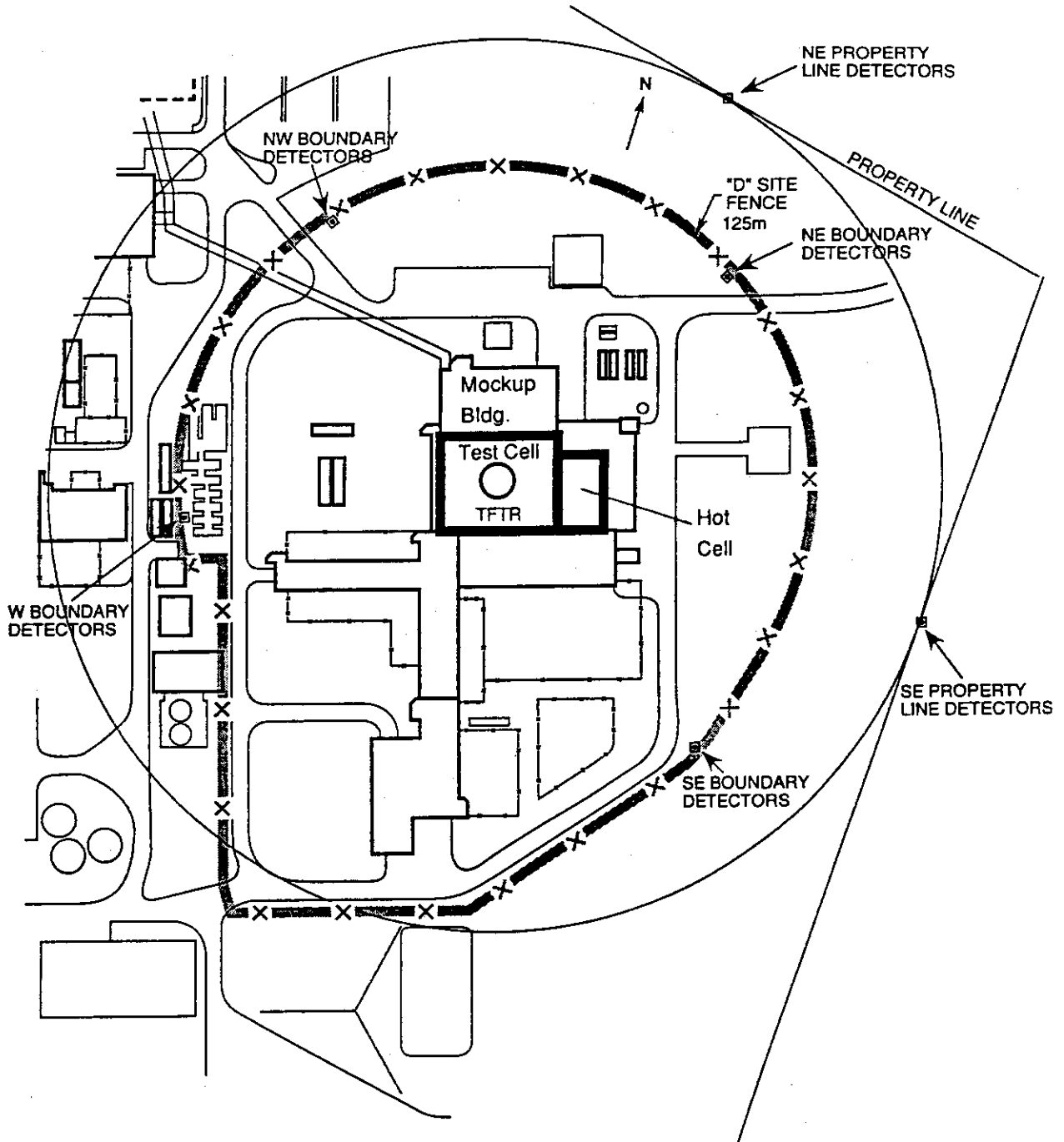


図4.2 PPPLのTFTRサイト (Dサイト) 平面図と線量当量検出器の配置

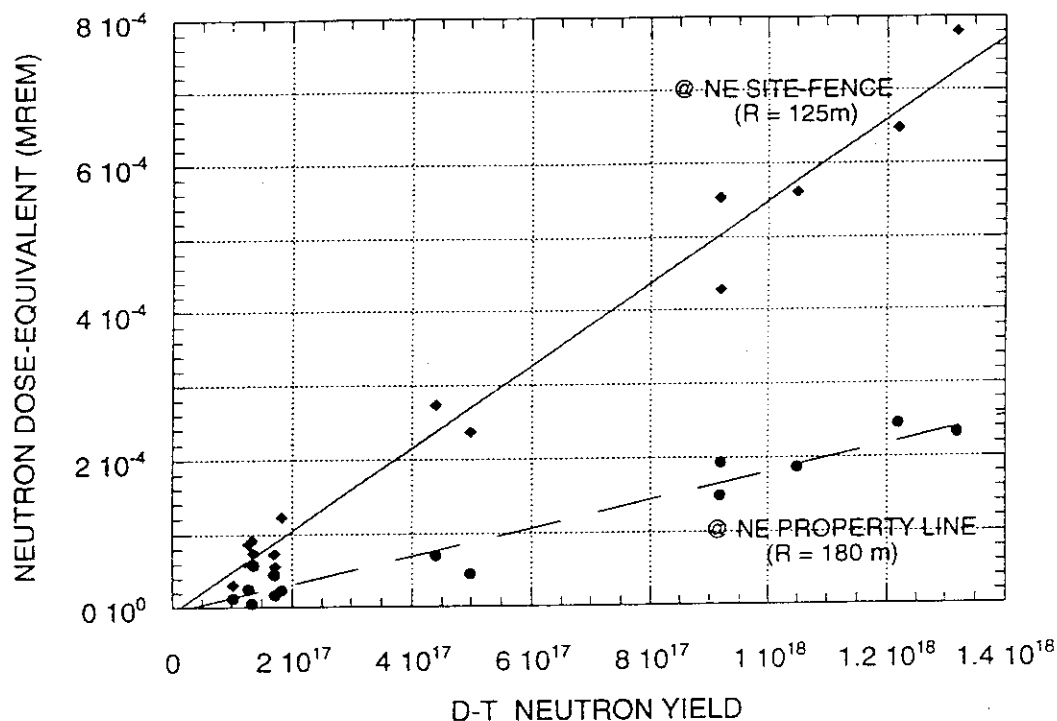


図4.3 DT中性子発生量に対するフェンス境界（125m, NE）および敷地境界地点（180m, NE）での中性子線量当量測定結果

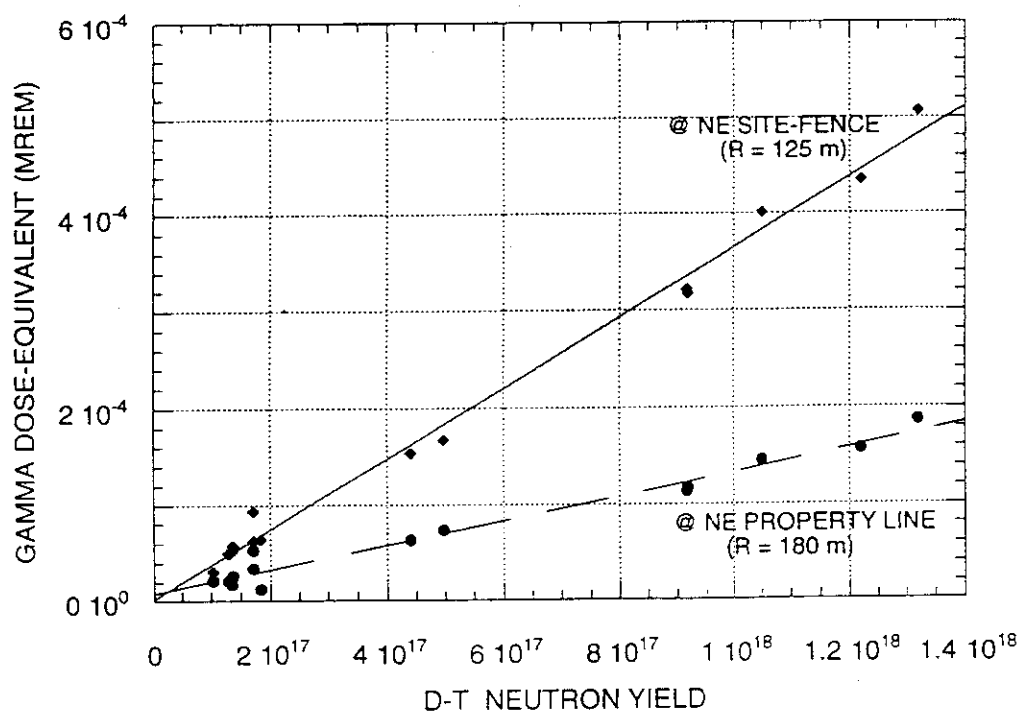


図4.4 DT中性子発生量に対するフェンス境界（125m, NE）および敷地境界地点（180m, NE）でのγ線量当量測定結果

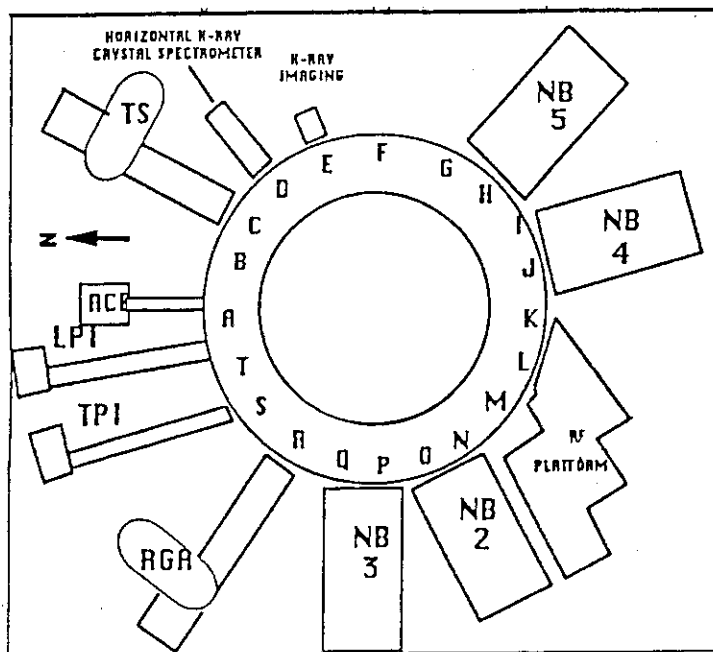


図5.1 TFTRの計測ポート番号 (BAY-A~Tの20ポートある)

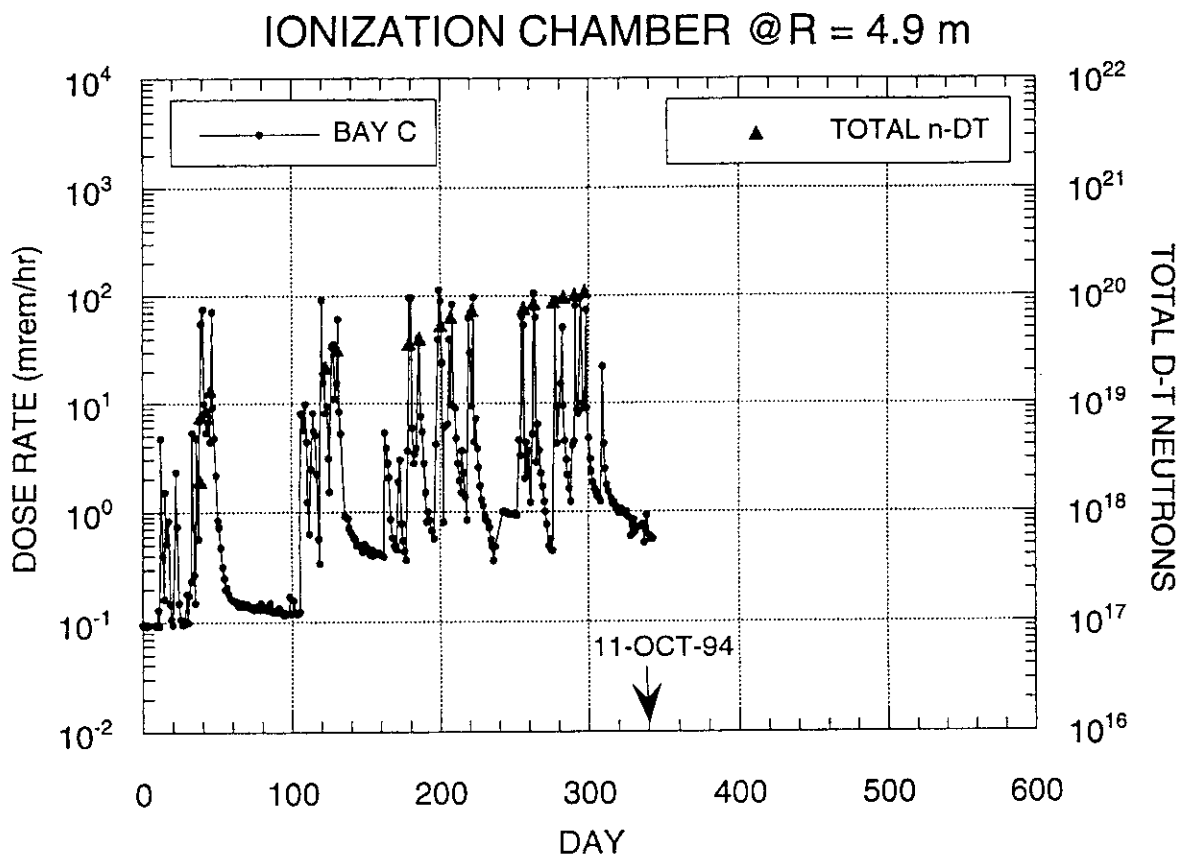


図5.2 TFTR真空容器周辺 (BAY-C) での残留 γ 線量当量の時間変化

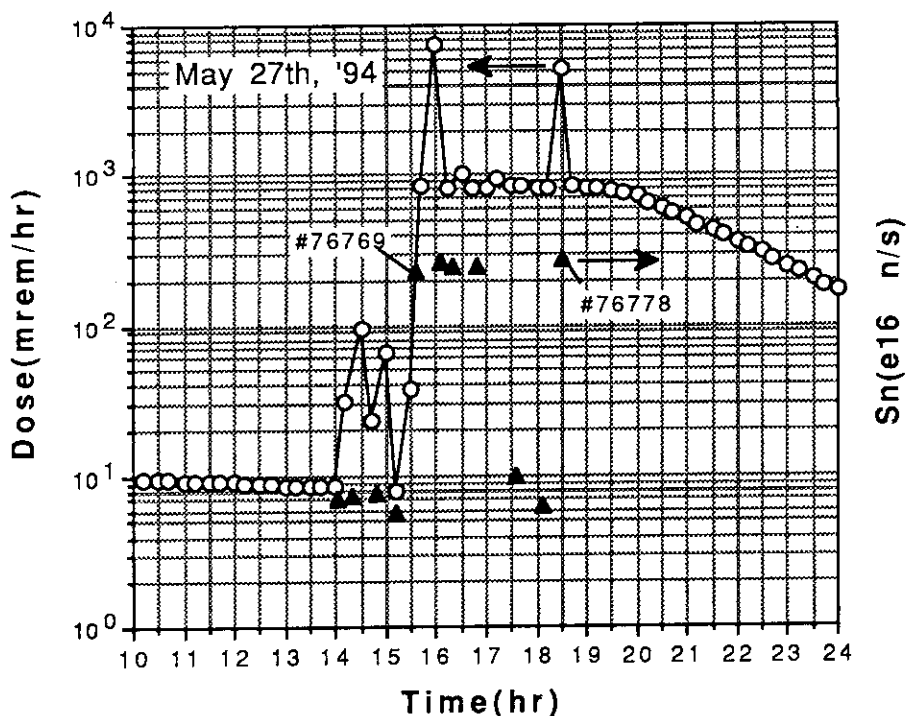


図5.3 Fusion power 9.3MWを達成した94年5月27日のTFTR真空容器周辺 (BAY - C) の残留 γ 線量当量の時間変化 (○:線量当量, ▲:DT中性子発生率)

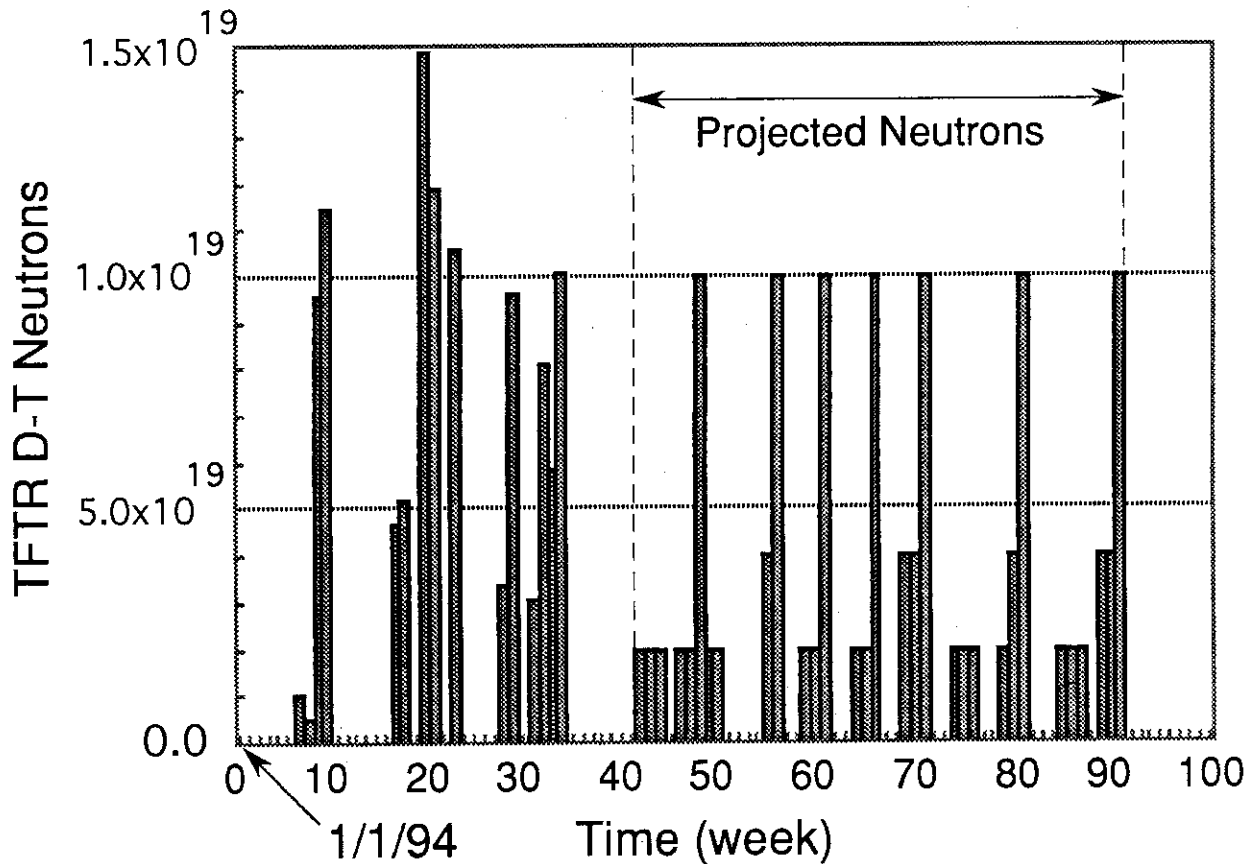


図5.4 TFTR週間中性子発生量 (34週以前は実績, 43週以降は予測)

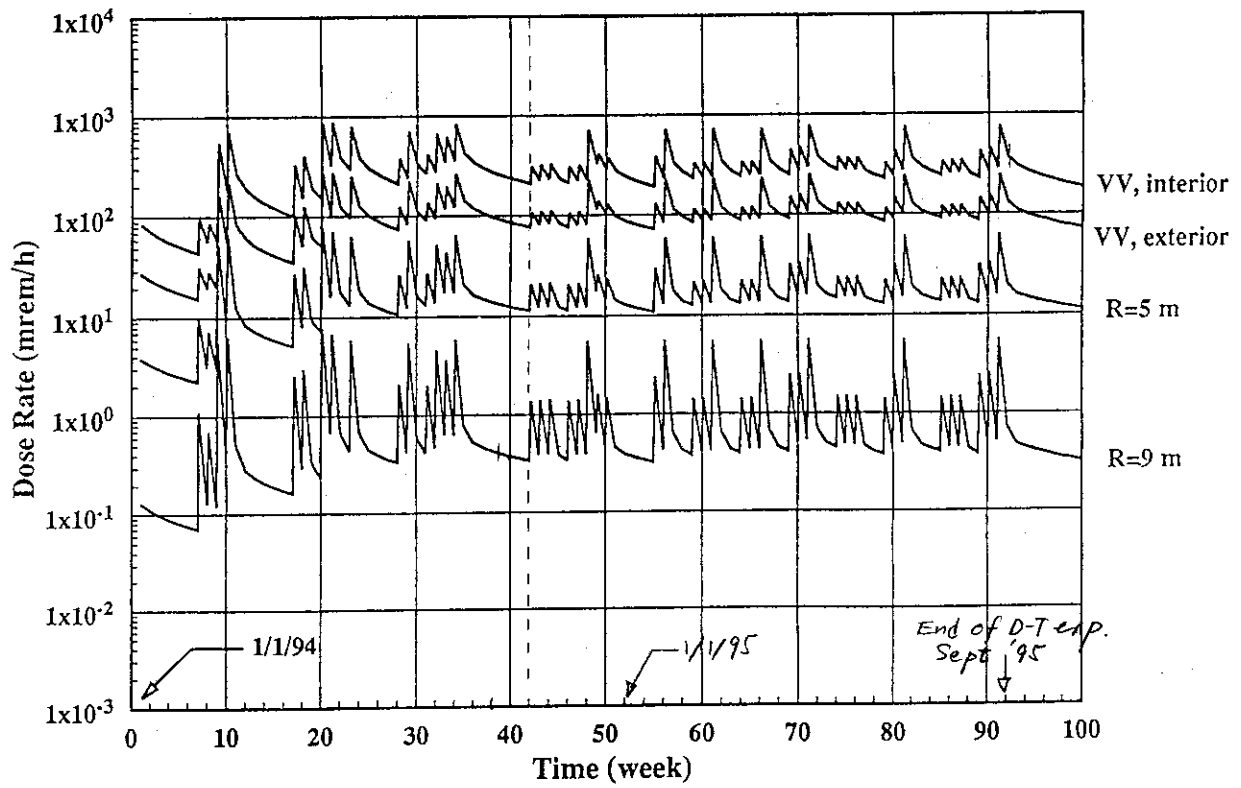


図5.5 TFTR真空容器周辺の残留 γ 線量当量 (34週以前は実績, 43週以降は予測)

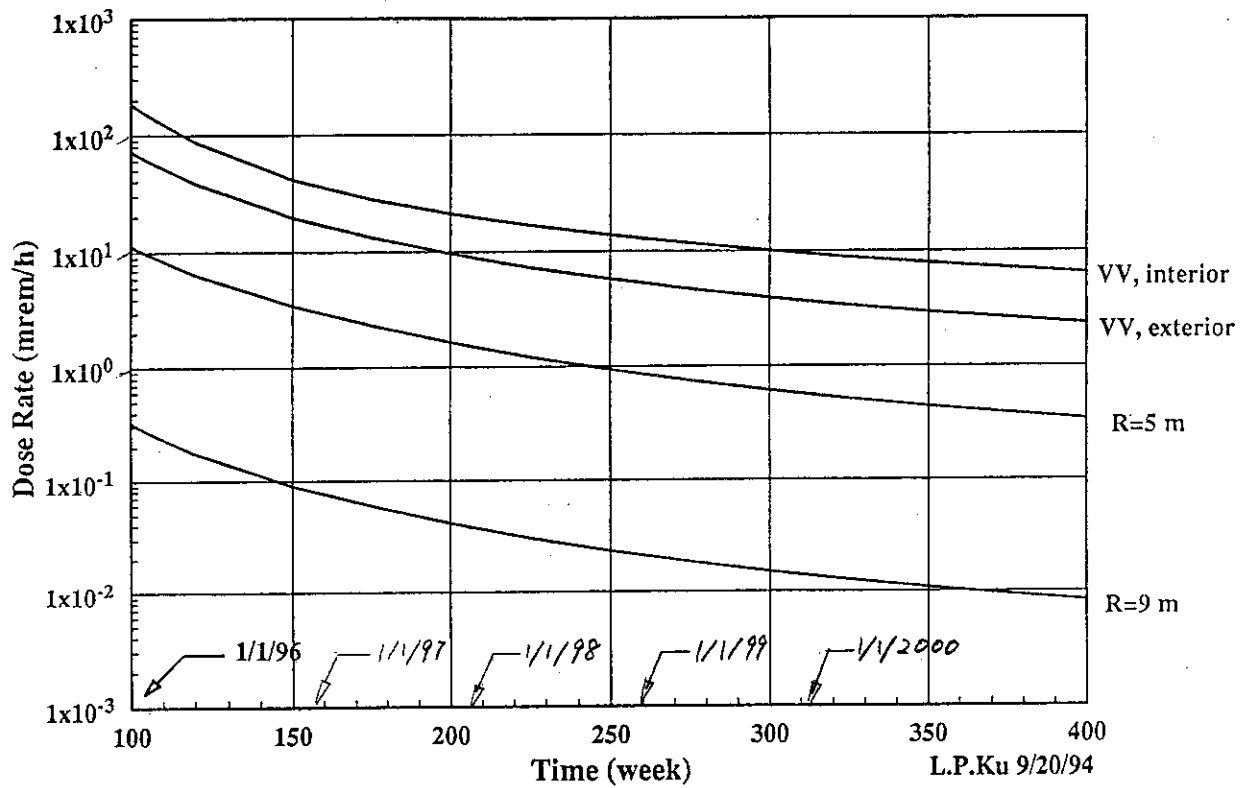


図5.6 DT実験終了後の真空容器周辺の残留 γ 線量当量予測

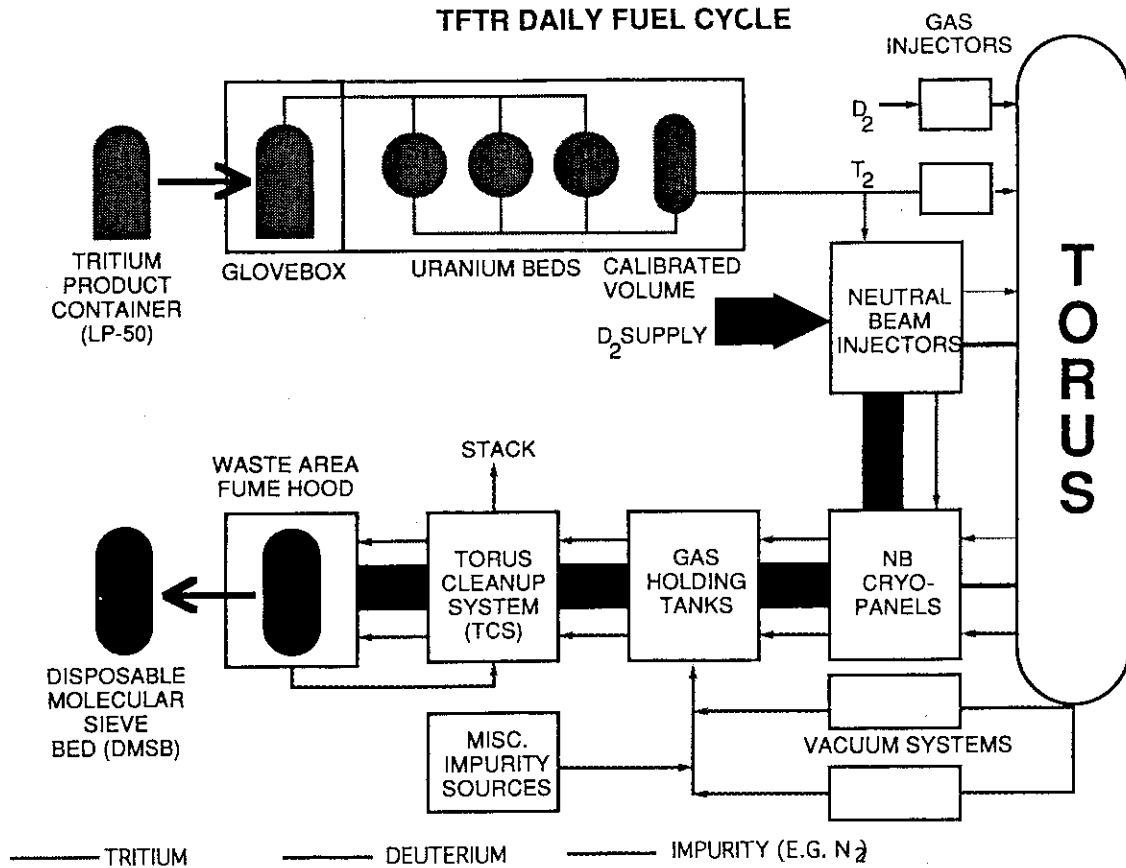


図6.1 TFTRトリチウム処理システム (文献 [6-5] より)

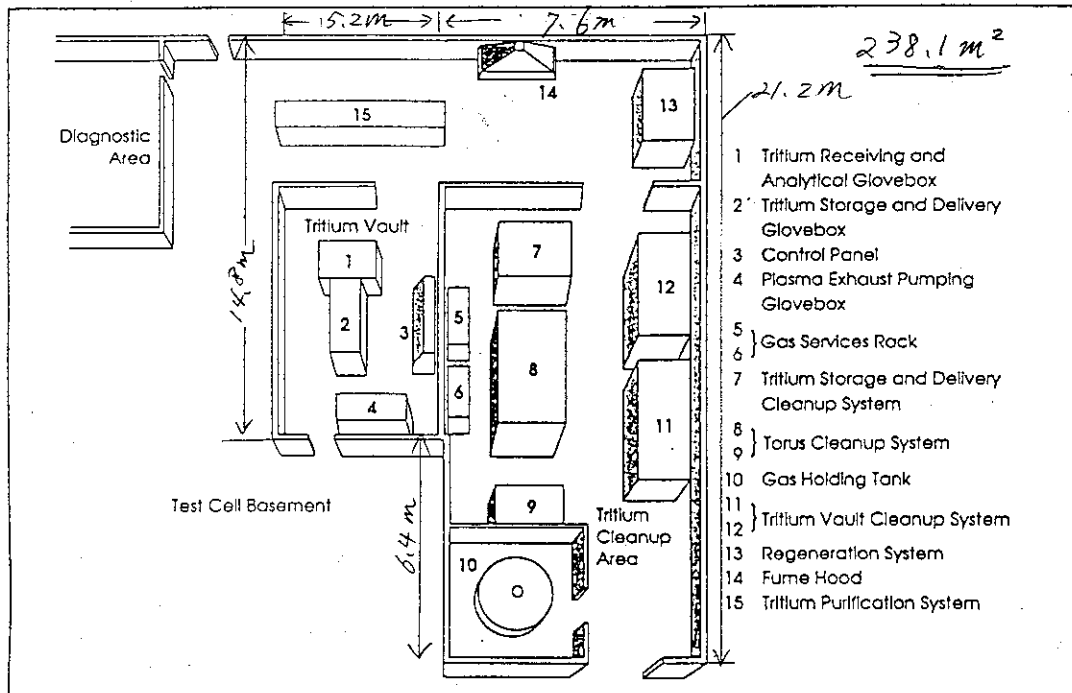


図6.2 TFTR Hot Cell 地下のトリチウム処理設備の機器配置

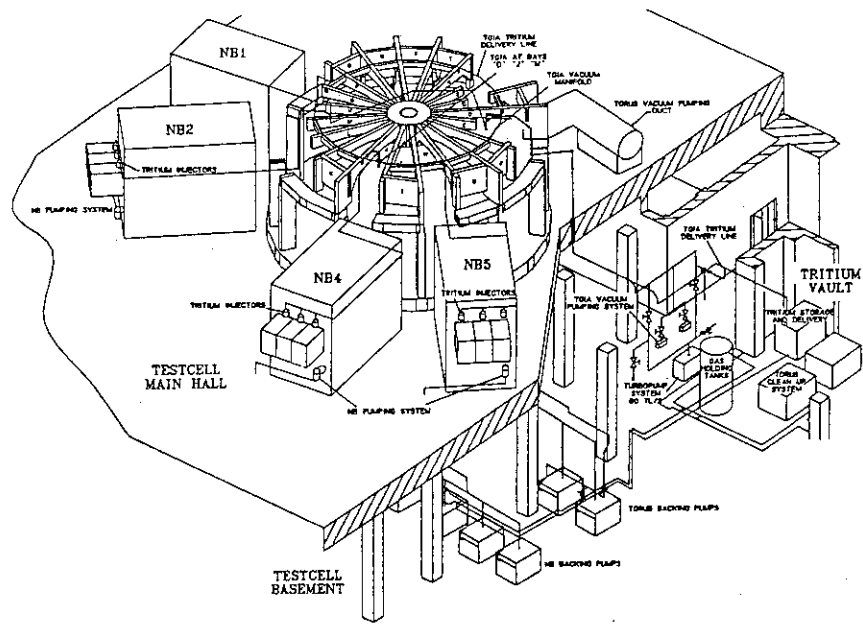


図6.3 TFTRトリチウムシステムの概要 (文献 [6-4] より)

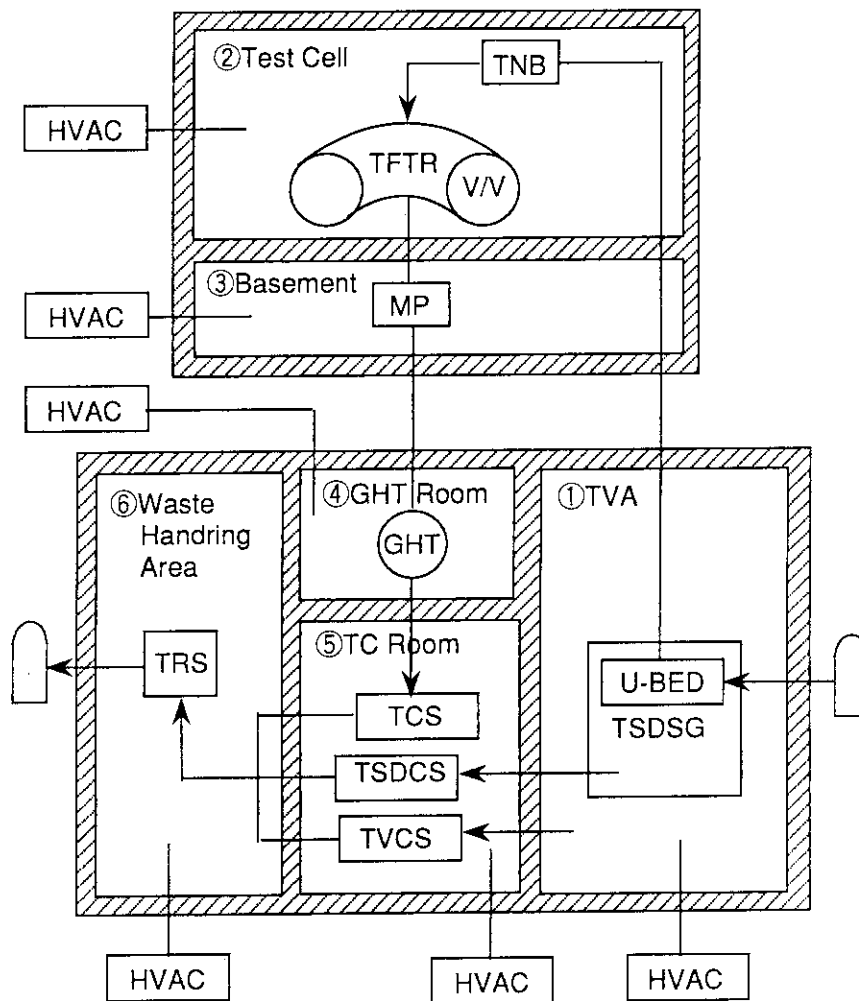


図6.4 トリチウム処理の安全系

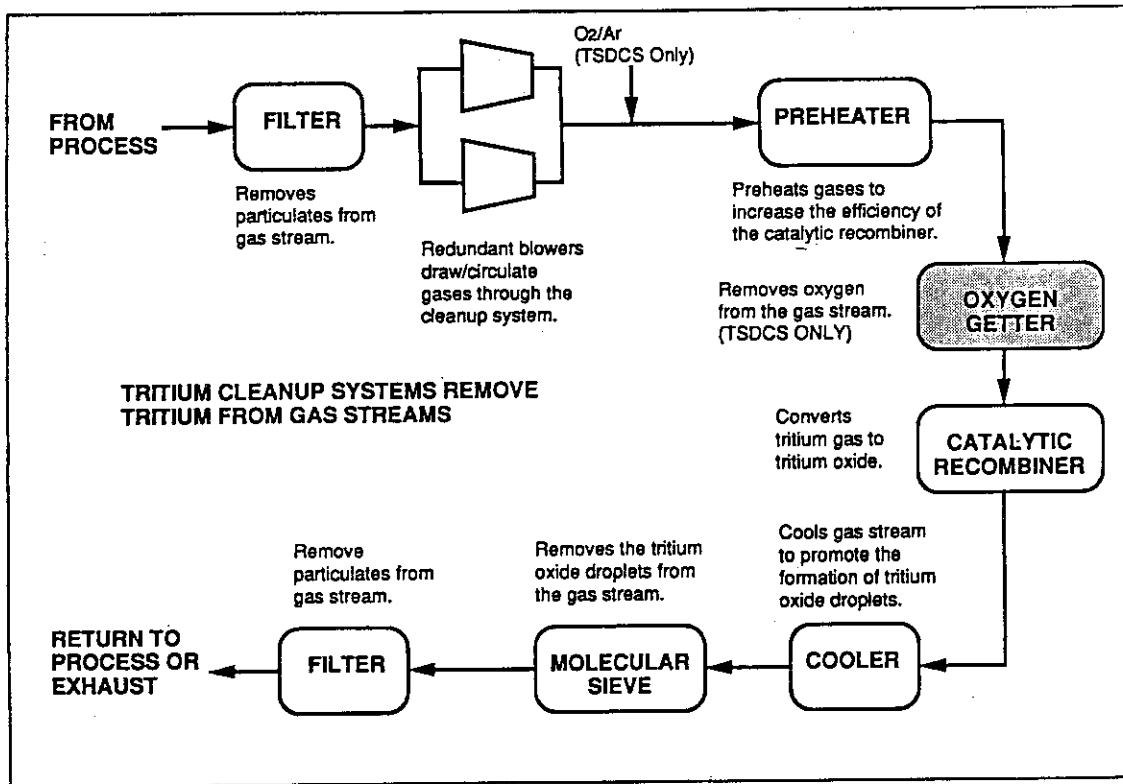


図6.5 トリチウム Cleanup Systemの機能ブロック図

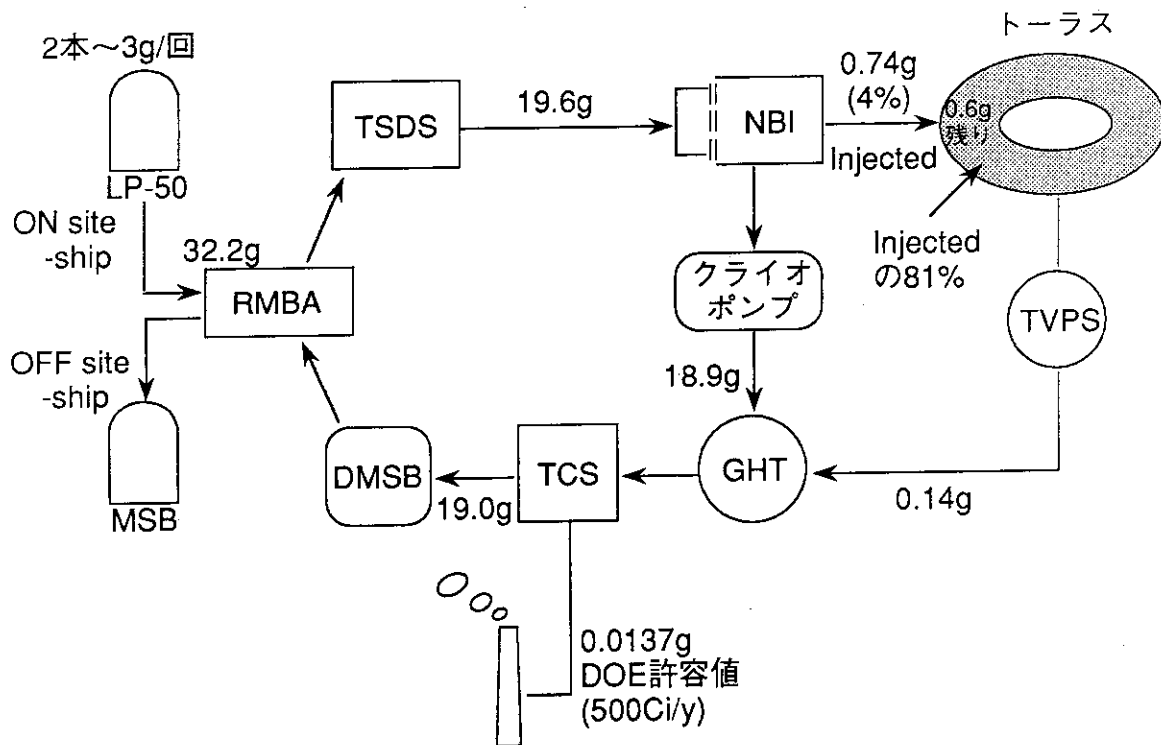


図6.6 TFTR DT実験におけるトリチウムフロー

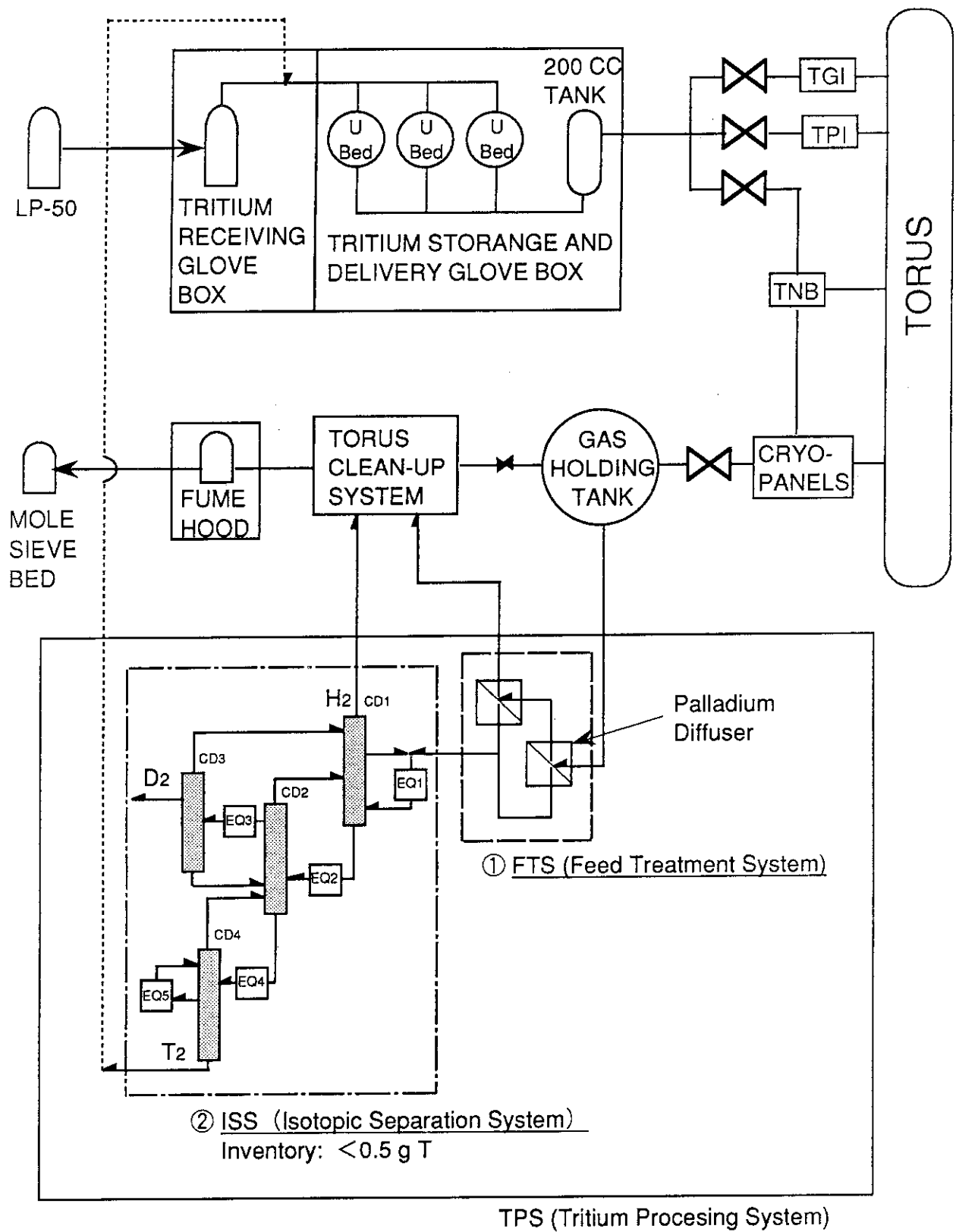


図6.7 TPS (Tritium Processing System) 導入後のTFTRトリチウム処理システム

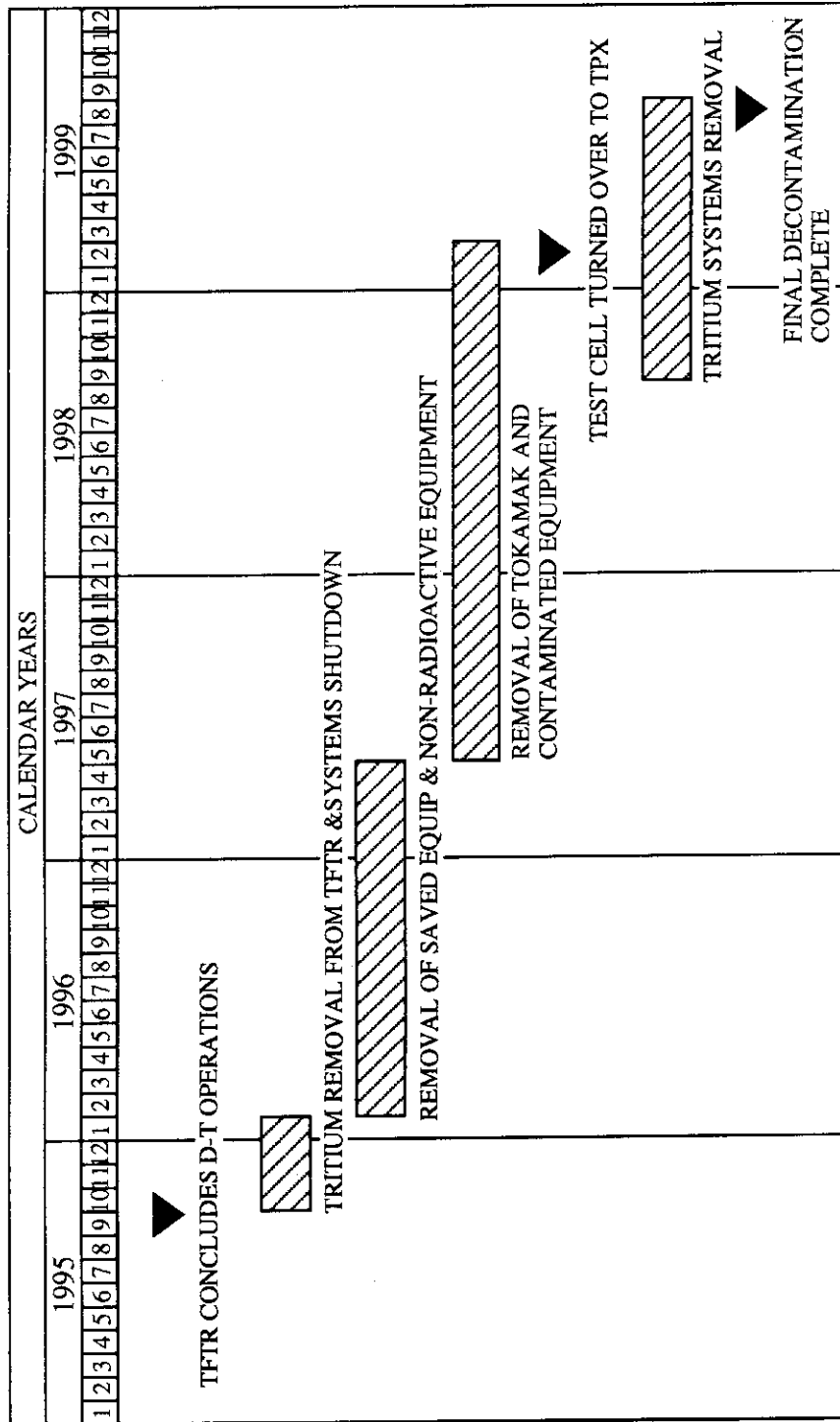


図 7.1 DT 実験終了後の TFTR シャットダウン及び解体計画

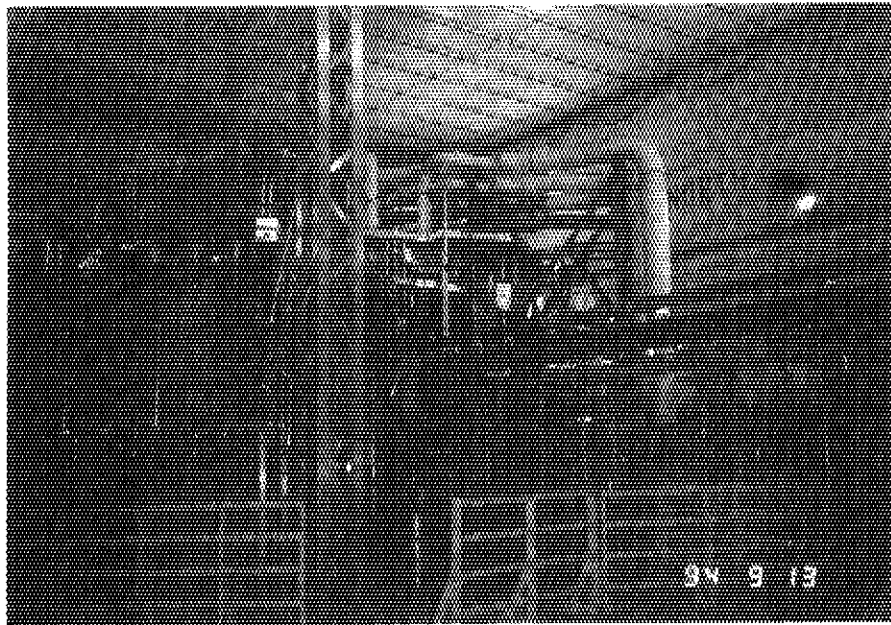


写真 4.1 Test Cell内Bay G付近から見た (NE方向) TFTR装置。左にNB5の3つのイオン源が見える。

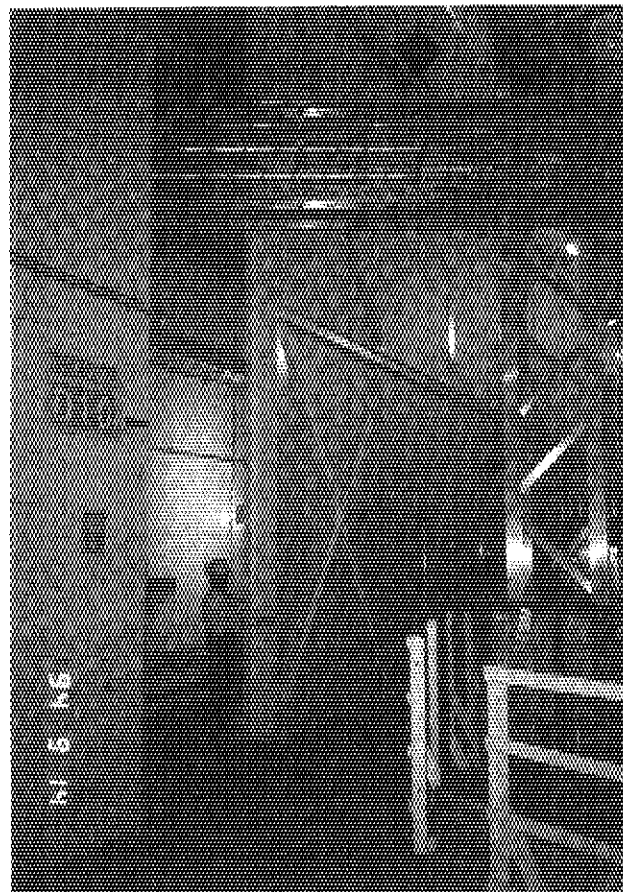


写真 4.2 Test Cell内北側に立つ厚さ30cmの追加遮蔽パネル

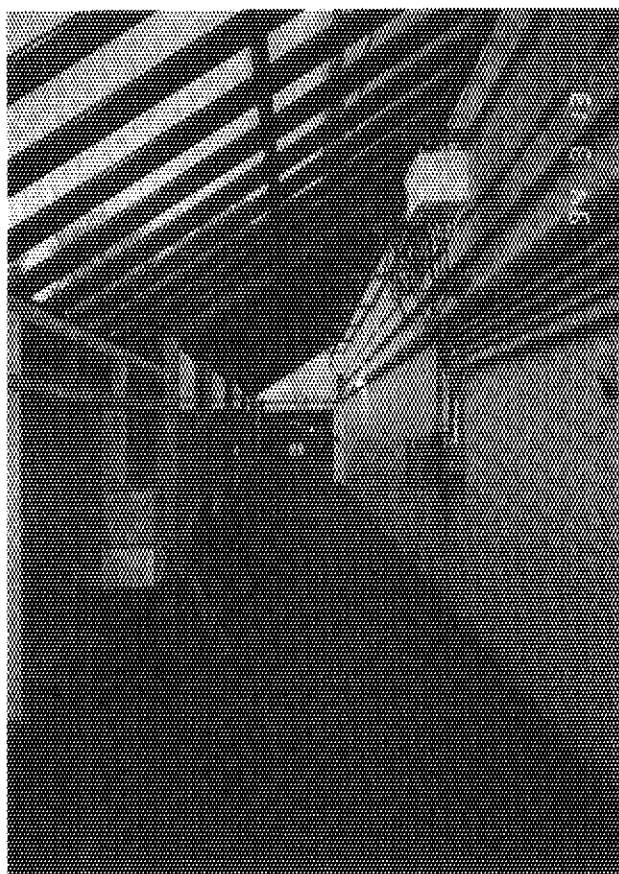


写真 4.3 Test Cell 西側外壁廊下にある中性子， γ 線計測器（Reuter Stokes 製）

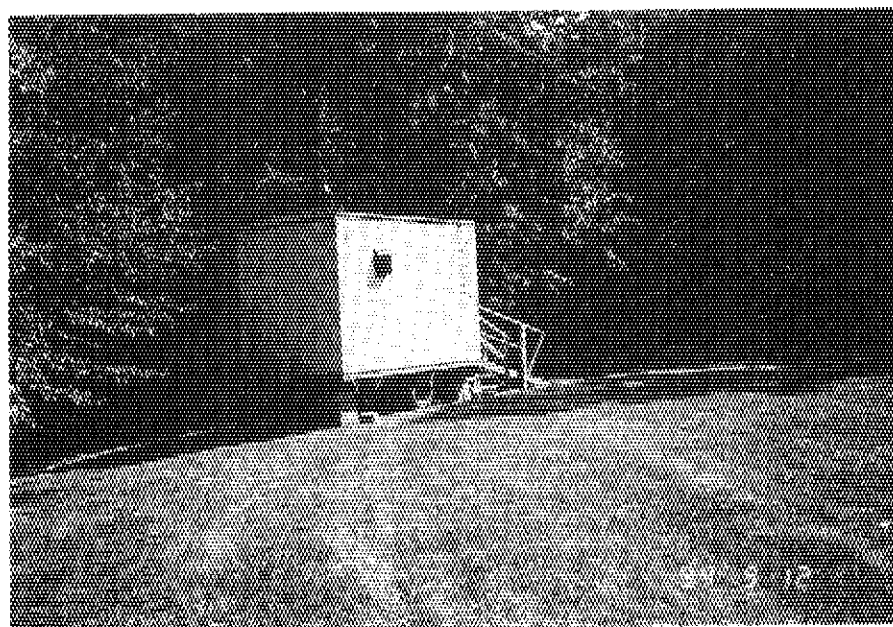


写真 4.4 施設周辺サイトフェンス脇の中性子， γ 線検出器（NE 地点）。移動式トレーラーに格納されている

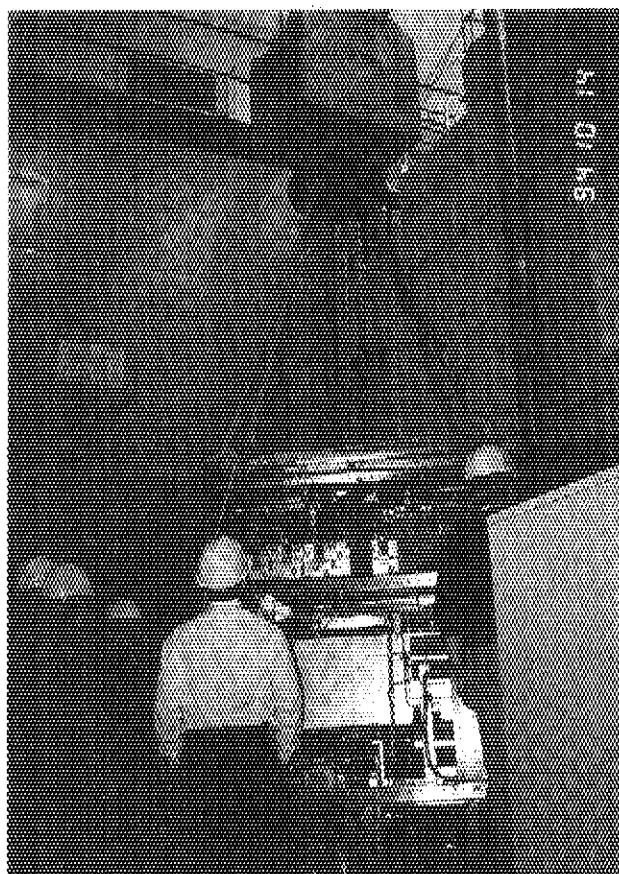


写真6.1 クレーンで組立て作業中のTPS（上ユニット：EQ，下ユニット：FTS）

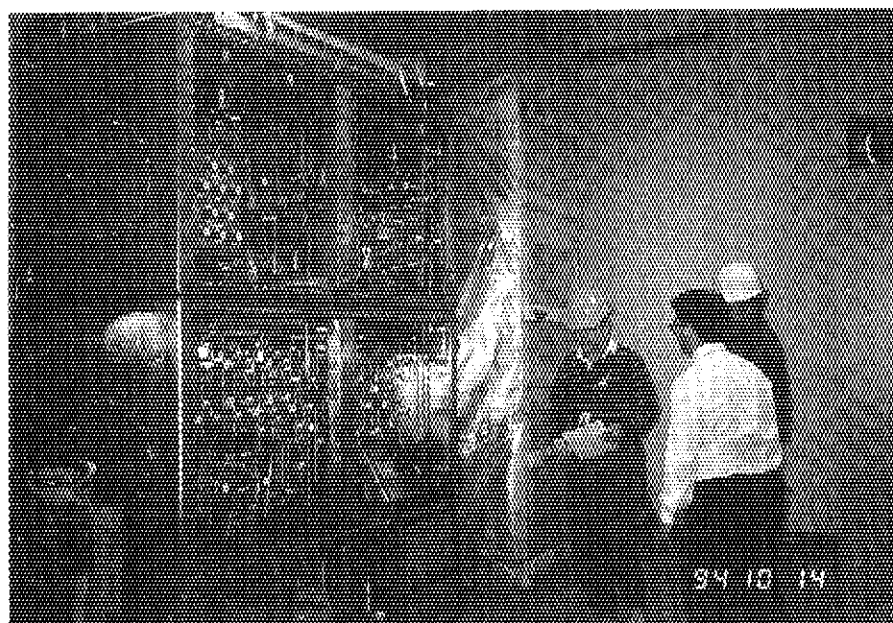


写真6.2 CDユニット（ビニールに梱包）脇に設置調整中のEQ，FTSユニット

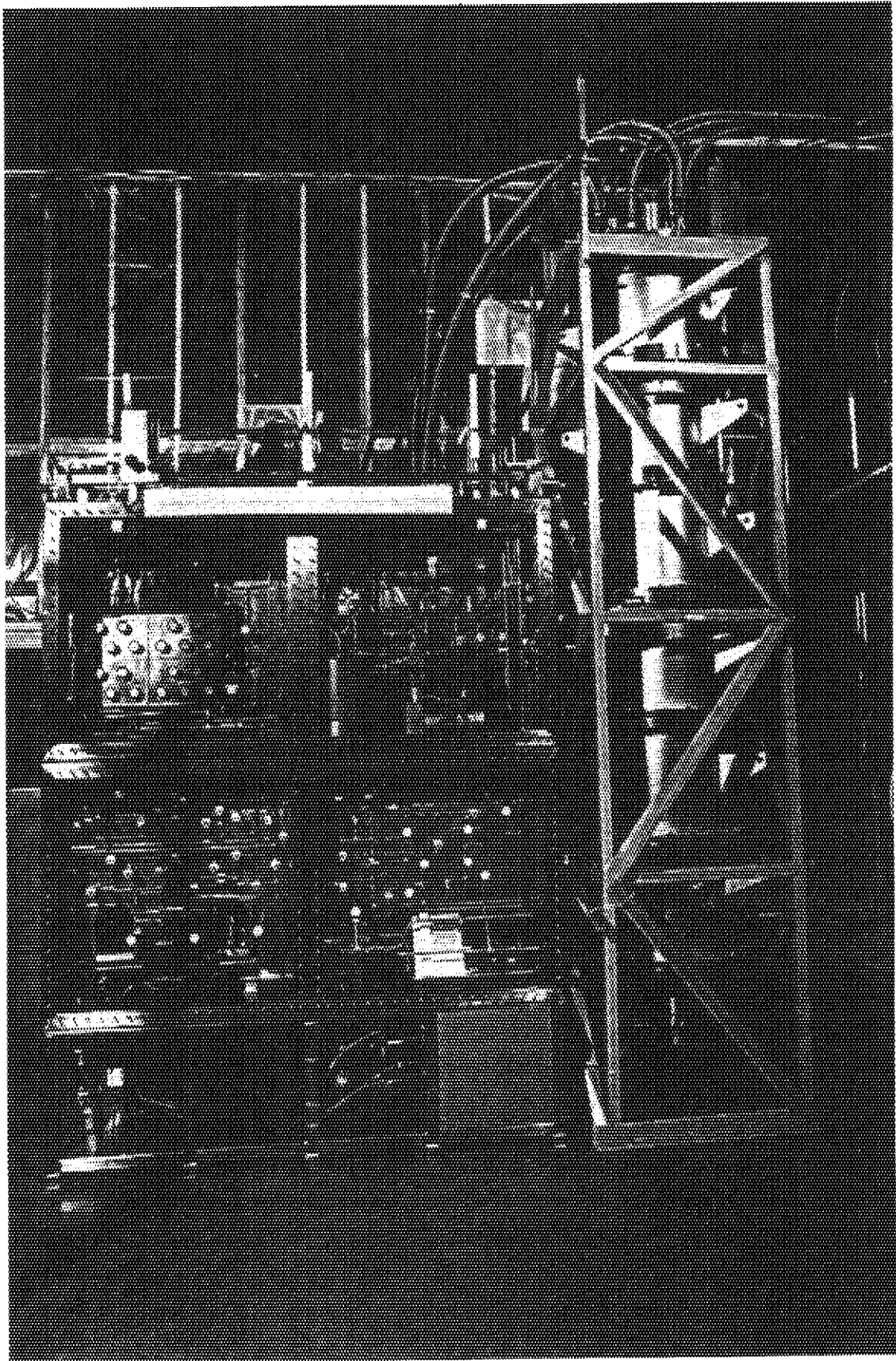


写真 6.3 据付完成後の TPS 設備

添付資料1 TFTR実験ログ (93年~94年9月のTASKPRINT)

	date	XP	title
Mon	1-FEB-1993	206	TFTR Cf-252 Neutron Calibration
Wed	3-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Thu	4-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Fri	5-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Sat	6-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Tue	16-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Thu	18-FEB-1993	207	DT Neutron Generator Calibration
Thu	1-JUL-1993	7	Machine startup
Fri	2-JUL-1993	7	Machine startup
Tue	6-JUL-1993	7	Machine startup
Wed	7-JUL-1993	6	Helium Density Scan
		7	Machine startup
Thu	8-JUL-1993	7	More NBI conditioning
Fri	9-JUL-1993	507	li Pellets
Mon	12-JUL-1993	507	li Pellets
Tue	13-JUL-1993	507	li Pellets
Wed	14-JUL-1993	507	li Pellets
Thu	15-JUL-1993	507	li Pellets
Fri	16-JUL-1993	6	Trace Tritium Setup
Thu	22-JUL-1993	69	NB, ICRF conditioning
Fri	23-JUL-1993	507	Li pellet conditioning
Sat	24-JUL-1993	599	Diag Calib: Gas filled torus for MSE
Mon	26-JUL-1993	507	Li pellet conditioning
Tue	27-JUL-1993	507	Li pellet conditioning
Wed	28-JUL-1993	7	DT7 Dry Run
		512	2.5MA Supershot development
Thu	29-JUL-1993	409	Jogs w/ 1.4MA, 5MW
		512	2.2 MA Supershots
		599	Diag calib: gas filled torus
Fri	30-JUL-1993	512	2.5MA supershots
Tue	12-OCT-1993	409	diag. checkout w/Jogs
Wed	13-OCT-1993	409	diag. checkout w/Jogs
Thu	14-OCT-1993	607	DT7 Dry Run
Fri	15-OCT-1993	607	Optimize Pellet Conditioning Strategy
Thu	21-OCT-1993	403	High Poloidal Beta Operation at High Q (R=262.5m)
		507	Li pellets in OH
Fri	22-OCT-1993	69	ICRF conditioning
		507	Li pellet conditioning
		514	Alfven modes
Wed	10-NOV-1993	507	Li pellet conditioning
Fri	12-NOV-1993	606	Trace Tritium
Mon	15-NOV-1993	606	Trace Tritium
		634	Trace Tritium gas puffs
Tue	16-NOV-1993	606	Trace Tritium
		623	Tritium Accounting & Cleanup
Wed	17-NOV-1993	69	ICRF conditioning
		606	Trace Tritium Dry Run
		634	Trace Tritium gas puffs
Thu	18-NOV-1993	69	ICRF Conditioning
		606	Trace Tritium Dry Run
Mon	22-NOV-1993	606	Trace Tritium R=3.0m, 2.15m, DPI
		634	Trace Tritium gas puffs
Tue	23-NOV-1993	606	Optimal Tritium Beam Injection
Wed	1-DEC-1993	507	Ohmic Li Pellet work
		601	Lost Alpha Detector
Thu	2-DEC-1993	409	diag checkout w/Jogs
		601	Lost Alpha Detector
		607	DT7 Dry run
		701	Helium density scan

Fri 3-DEC-1993 606 Investigate Trace-Tritium Beams
634 Trace tritium gas puffs @ 2 MA
Mon 6-DEC-1993 606 Optimize Trace-Tritium Beams
607 High Fusion Power in Trace T
Wed 8-DEC-1993 616 Trace Tritium Gas Puffing
Thu 9-DEC-1993 601 Lost Alpha detector
607 Fusion power
Fri 10-DEC-1993 607 Fusion power
Mon 13-DEC-1993 601 Lost Alpha detector
Tue 14-DEC-1993 409 diag checkout w/Jogs
623 Tritium Accounting & RF
Wed 15-DEC-1993 409 diag checkout w/Jogs
616 Trace Tritium Gas Puffing
Thu 16-DEC-1993 609 Alpha heating and VB/CHERS check
Fri 17-DEC-1993 611 ICRF with trace tritium

list run Year, single Date, single XP, Shot, Help, eXit[Y]?

	date	XP	title
Thu	3-FEB-1994	69	ICRF conditioning
Fri	4-FEB-1994	69	ICRF conditioning
Mon	7-FEB-1994	69	ICRF conditioning, Rp scan
Tue	8-FEB-1994	69	ICRF conditioning
		701	Helium density scan
Wed	9-FEB-1994	1	
		504	ICRF electron heating
Thu	10-FEB-1994	504	ICRF mode conversion
		516	ICRF with rotation
Mon	14-FEB-1994	610	Setup DT10 supershot Pb=24
Tue	15-FEB-1994	610	DT-10 dry run with He3 minority
Wed	16-FEB-1994	610	DT-10 dry run with He3 minority
Thu	17-FEB-1994	610	DT-10 dry run with He3 minority
Fri	18-FEB-1994	610	Setup for DT-10
Mon	21-FEB-1994	610	Setup for DT-10
Tue	22-FEB-1994	610	Setup for DT-10
Wed	23-FEB-1994	610	DT-10 dry run with He3 minority
Thu	24-FEB-1994	610	DT-10 run with tritium
Fri	25-FEB-1994	610	DT-10 dry run
Mon	28-FEB-1994	610	DT-10 run with tritium
Tue	1-MAR-1994	610	DT-10 run with tritium
Wed	2-MAR-1994	610	ICRF heating of D supershots
Thu	3-MAR-1994	610	DT-10 setup with He3
Fri	4-MAR-1994	610	DT-10 setup with He3
Mon	7-MAR-1994	610	DT-10 setup
Tue	8-MAR-1994	509	DT-2 setup
		610	DT-10 with Tritium
Wed	9-MAR-1994	633	High Beta Poloidal
Thu	10-MAR-1994	633	High Beta Poloidal
Fri	11-MAR-1994	633	High Beta Poloidal
Mon	21-MAR-1994	509	Setup for DT-2
		701	Helium Density Scan
Tue	22-MAR-1994	509	DT-2 Setup (TAE search)
Wed	23-MAR-1994	509	DT-2 Setup (TAE search)
Thu	24-MAR-1994	502	Locked mode studies
		511	Arbitrary Phase Studies
Fri	25-MAR-1994	511	Arbitrary Phase Studies
Mon	28-MAR-1994	511	ICRF Phase Studies
Tue	29-MAR-1994	604	TAE Instability Studies
Wed	30-MAR-1994	511	ICRF Phasing
Thu	31-MAR-1994	504	Electron Heating with MC
Fri	1-APR-1994	608	DT-8 Setup
		612	Setup OH and Pellets
Tue	12-APR-1994	509	TAE search
		602	DT-2 setup with ICRF and NBI
Wed	13-APR-1994	602	DT-2 Setup with ICRF and NBI
Thu	14-APR-1994	604	DT-4 Setup with NBI and D pellet
		624	DT-24 setup w NBI and ICRF
Fri	15-APR-1994	604	DT-4/DT-32 Setup with NBI
Wed	20-APR-1994	604	Conditioning for DT-4
Thu	21-APR-1994	604	DT-4 Setup
Fri	22-APR-1994	604	DT-4 Setup
Wed	27-APR-1994	604	DT-4 Setup with NBI
Thu	28-APR-1994	604	DT-4 Run with tritium
Fri	29-APR-1994	604	DT-4 Run with tritium
Mon	2-MAY-1994	602	DT-2 setup with ICRF and NBI
Tue	3-MAY-1994	602	DT-2 setup with NBI and ICRF
Wed	4-MAY-1994	602	DT-2 with tritium
Thu	5-MAY-1994	507	Li Pellet Conditioning

602 DT-2 with NBI and ICRF
 Fri 6-MAY-1994 507 Li Pellet Conditioning
 632 DT-32 setup run (Alpha CHERS)
 Mon 16-MAY-1994 632 DT-32 setup run (Alpha CHERS)
 Tue 17-MAY-1994 632 Run DT-32 alpha diagnostic
 Wed 18-MAY-1994 632 DT32 Alpha CHERS
 Thu 19-MAY-1994 507 Li/LiC Pellet Conditioning
 632 Run DT-32 alpha diagnostic
 Fri 20-MAY-1994 507 Li/LiC Pellet Conditioning
 Mon 23-MAY-1994 608 DT-8 High DT Power
 Tue 24-MAY-1994 608 DT-8 Setup - NB Conditioning
 701 He density scan
 Wed 25-MAY-1994 608 Run DT-8 2.5 MA max power
 Fri 27-MAY-1994 608 Max DT Fusion Pwr in Supershots
 Thu 2-JUN-1994 637 Set-up for DT-37 optimize pellets
 Fri 3-JUN-1994 637 Setup for DT-37 Li Conditioning
 Mon 6-JUN-1994 637 Setup for DT-37 Li Conditioning
 Tue 7-JUN-1994 637 DT-37 setup - optimize pellets
 Wed 8-JUN-1994 637 Set-up for DT-37 optimize pellets
 Thu 9-JUN-1994 633 Set up for DT-33 High beta poloidal
 Fri 10-JUN-1994 633 Set-up for DT-33 High beta poloidal
 Wed 6-JUL-1994 701 Helium density scan
 Thu 7-JUL-1994 504 ICRF Mode conversion
 Fri 8-JUL-1994 504 ICRF Mode conversion
 516 Rotation
 Mon 11-JUL-1994 615 H-Modes in DT Plasmas
 Tue 12-JUL-1994 615 H-Modes in DT Plasmas
 Wed 13-JUL-1994 615 Start DT-15 with DT H-Mode Plasmas
 Thu 14-JUL-1994 612 Setup OH and Pellets
 Fri 15-JUL-1994 604 Search for TAE Modes low Beta
 Mon 18-JUL-1994 627 Start Dt-27
 Tue 19-JUL-1994 627 Measurements of Helium Ash
 Wed 20-JUL-1994 412 L-mode scans for fluctuation measurement
 Thu 21-JUL-1994 633 High beta plasmas
 Fri 22-JUL-1994 69 ICRF Conditioning
 638 Ti & Vphi in D-D and D-T
 Mon 1-AUG-1994 633 H-Modes in DT Plasmas
 Thu 4-AUG-1994 638 CHERS Validation
 Fri 5-AUG-1994 638 CHERS Validation
 Mon 8-AUG-1994 69 ICRF Conditioning
 638 Ti and Vphi in DD and DT plasma
 Tue 9-AUG-1994 69 ICRF Conditioning
 620 Supershot Isotope Scaling
 638 CHERS validation: gas-filled torus
 Wed 10-AUG-1994 69 ICRF conditioning
 615 Start DT-15 with DT H-Mode Plasmas
 620 DT Isotope Transport Scaling
 Wed 17-AUG-1994 69 ICRF conditioning
 620 Recovery/setup for isotope scaling
 Thu 18-AUG-1994 620 Supershot isotope scaling
 Fri 19-AUG-1994 620 Supershot Isotope Scaling
 Mon 22-AUG-1994 620 DT Supershot Isotope Transport
 Tue 23-AUG-1994 620 DT Supershot Isotope Transport
 Wed 24-AUG-1994 69 ICRF conditioning
 621 ICRF Heating in DT-He3 Plasmas
 Thu 25-AUG-1994 621 ICRF Heating in DT-He3 Plasmas
 Fri 26-AUG-1994 620 DT isotope scaling
 621 ICRF Heating in DT-He3 Plasmas
 Tue 6-SEP-1994 610 DT-10
 Wed 7-SEP-1994 610 RF Heating of Supershots

添付資料 2 (1) TFTR実験ログ (94年5月27日のOPERPRINT)

Comments for 27-may-1994 Shots 76754 to 76788

```

76754 $$$$$$$$$$$$$$$$$ start of shift 1 $$$$$$$$$$$$$$$$$ 10:56
      PIC: M. Bell          COE: R. Camp          TFL: M. Bell
      XP: DT8  OBJECTIVE: Max DT Fusion Pwr in Supershots
      TF only -68kA; OH, EF, VC, HF o/c. Test after TF ground repair

76755 EFB-VC +1/+10kA; OH, HF o/c. 11:53

76756 EF test to 27.5kA - good 11:54

76757 EF test to 28.0kA - good 11:54

76758 OHB +15/-15/+5kA, 2 interrupters; EF, VC, HF o/c. OK 11:55

76759 HF only +2/-2kA; OH, EF, VC o/c 12:05

76760 F2. OK. However, we got > 1000 Amps on ground repair loop. 12:59

76761 Seq 803 conditioning. 13:12

76762 Repeat. 14:38

76763 1.65 MA, 2.45 m, 68 kA. MS76592. Good shot 4 pellets. 13:37

76764 2.5 MA, R = 2.52, TF = -73 kA. MS76748. Good -- all 8 requested 14:02
      beams and all 3 pellets. Shot D1.

76765 D2: a repeat of D1, but with 9 sources. Got all 9 + 2 pellets. 14:21

76766 PF only to clear loop fault on TF. Good: cleared. 14:37

76767 D3: 10 beams + 2 pellets. 28 MW. There was a carbon event. 14:50

76768 D1 repeat: Good. 15:11

76769 T3: 28 MW -- 1a&b failed. ~ 5.6 MW fusion power. 15:35

76770 T3: Got all beams: 7.7 MW fusion. 16:05

76771 T4: as above, but with 2 pellets before NBI. 31 MW -> 7 MW. 16:19
      Lost 4b.

76772 Repeat T4. ABORTED BECAUSE OF NB COMPUTER PROBLEM. 16:40
      @@@@@@@@@@@@@@@@@@ END OF SHIFT @@@@@@@@@@@@@@@@@@

76773 $$$$$$$$$$$$$$$$$ start of shift 2 $$$$$$$$$$$$$$$$$ 16:49
      PIC: K. WONG          COE: P. ALLING          TFL: M. Bell
      XP: DT8  OBJECTIVE: Max DT Fusion Pwr in Supershots
      TRITIUM SHOT T4, 2 LI PELLETS BEFORE NBI AND 1 PELLETT AFTER NBI,
      PB=34MW FOR 0.1SEC, THEN DROP TO 31MW, DT NEUTRONS JUST BELOW
      2.8E18 N/S.

76774 SHOT D1, 20MW BEAMS, GOOD. 17:34

76775 TEST SHOT TO CLEAR LOOP FAULT. NO PLASMA.GOOD. 17:42

76776 SHOT D3+ - ALL 11 SOURCES REQUESTED FOR 0.25 SEC, 17:54
      ABORTED DUE TO NEUTRAL BEAM PROBLEM.

76777 REPEAT,GOOD. 31 MW PEAK BEAM POWER. 18:06

76778 TRITIUM SHOT T4, ALL 11 SOURCES FIRED, 33MW, DISRUPTED AT 18:29
      3.95 SEC (I.E.,0.45S OF NBI),3.0E18N/S--8.46MW FUSION POWER.
      M-ETOT=6.2MJ BEFORE DISFRUPTION--ANOTHER NEW RECORD.

```

A 800 HORSE POWER COOLANT PUMP WAS TRIPPED BY THE DISRUPTION.
DINNER BREAK.

76779	CLEAN UP SHOT WITH #802, USE 14KA PRECHARGE, REACH 0.9MA AND DISRUPTED AT 1.0 SEC. NOT BAD.	21:10
76780	REPEAT, FIZZLES EARLY AT 0.1 SEC.	21:21
76781	0.6MA ATTEMPT (IP#18), GOOD! NEL=1E19, SLIDEAWAY DISCHARGE.	21:29
76782	REPEAT, FIZZLES DUE TO OH FAULT.	21:40
76783	LOWER OH PRECHARGE TO 12KA, FIZZLES, IOH FAILS TO REVERSE.	21:50
76784	IOH=14KA, OK.	22:03
76785	REPEAT.	22:03
76786	CLOSE ONE NEUTRAL BEAM TIV WHICH HAS WATER LEAK.	22:07
76787	REPEAT, STILL SLIDEAWAY DETACHED PLASMA.	22:14
76788	RAISE PREFILL FROM 5E-6 TO 8E-6 TORR, ABORTED DUE TO GROUND FAULT. RUN TERMINATED DUE TO PERSISTENT GROUND FAULT.	22:18

添付資料3 (2) TFTR実験ログ (94年5月27日のTASKPRINT)

Fri 27-MAY-1994 XP: 608 Max DT Fusion Pwr in Supershots
 TFL: M. Bell Page: 1

shot	grade	Ip stars	C2t @3.2 *E-6	Pb @2.1 *E-13	Wtot @TMAX *1.	SnDT @TMAX *E-6	Notes
76760		0.9	0.91		0.0	0.0	F2 after series of field test shots. OK
76761		1.4	2.08		0.1	0.0	OH shot in D for NB sync. conditioning
76762		1.4	1.75		0.1	0.0	Repeat
76763	A	1.6	5.34		0.5	0.0	D-0. Li 1.8, 2.2, 3.6, 4.0 s.
76764	A *	2.5	3.56	22.4	4.1	7.2	D-1. Li 2.2,2.7,4.75s. tau_E-0.20s. Good
76765	A *	2.5	3.90	24.9	4.4	7.4	D-2. Li 2.7,4.65s. tau_E drop at 4.0s. OH only to clear TF fault
76766							
76767	B *	2.5	4.12	28.0	4.6	7.6	D-3. Li 2.7,4.65s. C "event" @ 4.1s.
76768	A *	2.5	3.91	22.4	4.0	5.7	D-1. Li 2.7,4.75s. Good repeat
76769	B T*	2.5	4.08	27.9	5.5	226	T-3. Li 2.7,4.75s. 1a,1b (D) failed.
76770	A T*	2.5	3.89	33.5	6.0	266	T-3. Li 2.7,4.75s. Got it all
76771	B T*	2.5	3.62	30.7	5.8	252	T-4. Li 2.2,2.7,4.75s. 4b (D) failed
76772							Aborted
76773	B T*	2.5	3.72	30.5	5.8	250	T-4. Li 2.2,2.7,4.65. 4b short. Minor disruption
76774	B *	2.5	3.59	20.9	3.7	10	D-1 to recover. Li 2.2,2.7s. 4b failed
76775							OH only to clear TF loop fault
76776							Aborted
76777	B	2.5	4.12	30.6	3.7	6.4	D shot with short NBI to test all sources
76778	A T*	2.5	3.84	33.5	6.2	272	T-4. Li 2.2,2.7,4.65s. Got all NBI and the mother of all disruptions.
...							