JAEA-Technology 2013-031



### JT-60トカマク解体の完遂

Disassembly of JT-60 Tokamak Device

岡野 文範	池田 佳隆	逆井 章 右	花田 磨砂也
市毛 尚志	三代 康彦	神永 敦嗣	笹島 唯之
西山 友和	柳生 純一	石毛 洋一	鈴木 宏章
小室 健一			

Fuminori OKANO, Yoshitaka IKEDA, Akira SAKASAI, Masaya HANADA Hisashi ICHIGE, Yasuhiko MIYO, Atsushi KAMINAGA, Tadayuki SASAJIMA Tomokazu NISHIYAMA, Jun-ichi YAGYU, Yoichi ISHIGE, Hiroaki SUZUKI and Kenichi KOMURO

> 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット

Division of Tokamak System Technology Fusion Research and Development Directorate

November 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency. 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

### JT-60 トカマク解体の完遂

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

岡野 文範、池田 佳隆、逆井 章、花田 磨砂也⁺、

市毛 尚志、三代 康彦、神永 敦嗣、笹島 唯之、

西山 友和、柳生 純一、石毛 洋一、鈴木 宏章\*1、小室 健一\*1

(2013年6月27日 受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60)のトカマク本体及び周辺設備の解体 (総重量として約5,400トン)は、H21年度から着手しH24年度(H24年10月)に完遂した。JT-60は、日欧共同で進めるサテライト・トカマク計画として、長パルス化と高圧力プラズマを目指した超伝導核融合 実験装置 JT-60SA に改修するため、JT-60トカマク本体及び周辺設備を解体・撤去する必要があった。

JT-60 解体は、核融合実験装置として放射線障害防止法に基づいて実施した唯一のものである。解体に当り、トロイダル磁場コイル(TFコイル)の補強溶接部の切断と真空容器の2分割は、 工程的、技術的に大きな課題であったが、それぞれの解決策を見出して作業を進め、H24年10 月に3年に亘る解体を無事故・無災害で完遂することができた。

本報告書は、JT-60 解体の概要を本体装置中心に解体全般についてまとめたものである。

那珂核融合研究所:〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

※1 技術開発協力員

<sup>+</sup> ITER プロジェクトユニット

JAEA-Technology 2013-031

### **Disassembly of JT-60 Tokamak Device**

Fuminori OKANO, Yoshitaka IKEDA, Akira SAKASAI, Masaya HANADA<sup>+</sup>, Hisashi ICHIGE, Yasuhiko MIYO, Atsushi KAMINAGA, Tadayuki SASAJIMA, Tomokazu NISHIYAMA, Jun-ichi YAGYU, Yoichi ISHIGE, Hiroaki SUZUKI<sup>\*1</sup>, and Kenichi KOMURO<sup>\*1</sup>

> Division of Tokamak System Technology Fusion Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Naka-shi,Ibaraki-ken

> > (Received June 27, 2013)

The disassembly of JT-60 tokamak device and its peripheral equipments, where the total weight was about 5400 tons, started in 2009 and accomplished in October 2012. This disassembly was required process for JT-60SA project, which is the Satellite Tokamak project under Japan-EU international corroboration to modify the JT-60 to the superconducting tokamak.

This work was the first experience of disassembling a large radioactive fusion device based on Radiation Hazard Prevention Act in Japan. The cutting was one of the main problems in this disassembly, such as to cut the welded parts together with toroidal field coils, and to cut the vacuum vessel into two. After solving these problems, the disassembly completed without disaster and accident. This report presents the outline of the JT-60 disassembly, especially tokamak device.

Keywords: JT-60SA, JT-60, Disassembly, TFcoil, PFcoil, Radiation Hazard Prevention Act

<sup>+</sup> Division of ITER Project

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer

### 目 次

1. は	じめに		1
2. JT-	-60 解体の作業内容		2
2.1	JT-60 概要		2
2.2	解体のための切断作業		2
2.3	放射線管理		4
3. JT-	-60 解体作業の進捗		6
3.1	解体スケジュール		6
3.2	2009年(H21年度)の解体作業		6
3.3	2010年(H22年度)の解体作業		7
3.4	2011 年(H23 年度)の解体作業		7
3.5	2012 年(H24 年度)の解体作業		8
4. 解	体作業における作業分析		8
5. ま	とめ		9
謝辞		1	10
参考文	〔献	1	10

### Contents

1.	Introduction	1
2.	Work of disassembly of JT-60 tokamak	2
	2.1 Outline of JT-60	2
	2.2 Cutting work	2
	2.3 Radiation control	4
3.	Progress of disassembly of JT-60 tokamak	6
	3.1 Schedule of disassembly	6
	3.2 Progress of disassembly of 2009(H21)	6
	3.3 Progress of disassembly of 2010(H22)	7
	3.4 Progress of disassembly of 2011(H23)	. 7
	3.5 Progress of disassembly of 2012(H24)	8
4.	Results and discussions	8
5.	Summary	9
A	cknowledgements	10
Re	eferences	10

### 図リスト

図 1	サテライトトカマク計画	11
図 2	JT-60 トカマク装置(解体前の状態)	12
図 3	JT-60 本体装置の鳥瞰図	13
図 4	TF コイル補強溶接部の切断	14
図 5	ダイヤモンドワイヤーソーとフライスによる切断方法	15
図 6	本体室における領域管理	16
図 7	解体機器の保管方法	17
図 8	解体品の管理方法	18
図 9	JT-60 の解体スケジュール	19
図 10	JT-60 本体装置の解体の主なフロー	20
図 11	<b>2009</b> 年の作業	21
図 12	2010年(前半)の解体作業	22
図 13	2010年(後半)の解体作業(1)	23
図 14	2010年(後半)の解体作業(2)	24
図 15	2011年の解体作業(1)	25
図 16	2011年の解体作業(2)	26
図 17	2011年の解体作業(3)	27
図 18	2011年の解体作業(4)	28
図 19	2011年の解体作業(5)	29
図 20	2012 年の解体作業の概要	30
図 21	2012年の解体作業(1)	31
図 22	2012年の解体作業(2)	32
図 23	2012年の解体作業(3)	33
図 24	2012年の解体作業(4)	34
図 25	2012年の解体作業(5)	35
図 26	2012年の解体作業(6)	36
図 27	2012年の解体作業(7)	37
図 28	2012年の解体作業(8)	38
図 29	2012年の解体作業(9)	39
図 30	2012年の解体作業(10)	40
図 31	解体の実績工程	41
図 32	解体作業における作業量の割合	42

### List of figures

Fig.1	Satellite tokamak program	11
Fig.2	JT-60 tokamak device(Before disassembly)	12
Fig.3	Bird's-eye view of JT-60 tokamak	13
Fig.4	Cutting method by milling and diamond wire saw	14
Fig.5	Cutting of welding parts of TFcoil	15
Fig.6	Area management in the torus hall	16
Fig.7	Storage method of disassembly components	17
Fig.8	Management of disassembly components	18
Fig.9	Schedule of JT-60 tokamak disassembly	19
Fig.10	Disassembly flow of JT-60 tokamak device	20
Fig.11	Work of 2009	21
Fig.12	Disassembly work of 2010(First half)	22
Fig.13	Disassembly work of 2010(Second half) (1)	23
Fig.14	Disassembly work of 2010(Second half) (2)	24
Fig.15	Disassembly work of 2011(1)	25
Fig.16	Disassembly work of 2011(2)	26
Fig.17	Disassembly work of 2011(3)	27
Fig.18	Disassembly work of 2011(4)	28
Fig.19	Disassembly work of 2011(5)	29
Fig.20	Outline of disassembly of 2012	30
Fig.21	Disassembly work of 2012(1)	31
Fig.22	Disassembly work of 2012(2)	32
Fig.23	Disassembly work of 2012(3)	33
Fig.24	Disassembly work of 2012(4)	34
Fig.25	Disassembly work of 2012(5)	35
Fig.26	Disassembly work of 2012(6)	36
Fig.27	Disassembly work of 2012(7)	37
Fig.28	Disassembly work of 2012(8)	38
Fig.29	Disassembly work of 2012(9)	39
Fig.30	Disassembly work of 2012(10)	40
Fig.31	Detailed disassembly schedule	41
Fig.32	Percentage of disassembly work	42

This is a blank page.

### 1. はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60)のトカマク本体及び周辺設備の解体(総重量として約 5,400 トン)は、H21 年度から着手し H24 年度(H24 年 10 月)に完遂した。JT-60 は、日欧共同で進めるサテライト・トカマク計画として、長パルス化と高圧力プラズマを目指した超伝導核融合実験装置JT-60SA に改修するため、JT-60 トカマクを解体・撤去する必要があった(図 1)。

JT-60 は、放射線障害防止法に基づく国内唯一のプラズマ発生装置であり、平成3年から平成 20年の18年間の重水素実験で発生した中性子により本体室の機器は放射化している。そのた め、解体作業は放射線障害防止法に基づいて実施し、解体品の切粉や切断片等の放射化物の飛 散防止を図るとともに作業毎に作業員や解体品の放射線測定を実施した。さらに、解体した機 器等は将来のクリアランス処理を考慮して放射線測定データだけでなく材料、重量等のデータ も管理記録し、管理区域内に保管した。一方、JT-60本体は強力な電磁力に耐えるように主要構 造物(例えばトロイダル磁場コイル構造体)は超硬材である高マンガン鋼からなり、更にそれら の構造体は本体中心部の狭隘部で溶接補強を行っていることから、超硬材の狭隘部での切断が 課題であった。このため、解体にあたっては、単に組立手順の逆を行うのではなく、作業時の 被ばく管理や解体品の保管場所までの流れを考慮しつつ解体手順を構築するとともに、その解 体手順を実現するための適切な切断方法を見出す必要があった。加えて本体室においては多く の解体作業を同時に行う必要があることから、これらの安全作業体制を構築し、作業の安全実 施に注力した。

JT-60 本体解体においては、トロイダル磁場コイル(TF コイル)の補強溶接部の切断と真空容 器の2分割を如何にして行うかが以下に述べるように工程的、技術的に大きな課題であった。 TF コイルは、電磁力や転倒力により掛かる力を抑えるために2個1組で上下2箇所の狭隘部を 補強溶接している。TF コイルの解体にはこの補強溶接部を切断する必要があり、この狭隘な場 所で難削材の高マンガン鋼を切断するため、小型で且つ分解して持込んだ後狭隘部での再組立 てが可能な専用のフライス加工機を開発し、この課題を解決した。TF コイルを撤去した真空容 器は、高マンガン鋼材で固定されたポロイダル磁場コイル(PF コイル)が一体構造となっている。 一方、建屋クレーンの定格荷重は250トンであり、この制限を超えないように、一体構造を2 分割する必要があった。真空容器の材質は、難削材のインコネル、PF コイルは無酸素銅、高マ ンガン鋼であり、2分割のためには、異種金属を同時に切断する必要があった。

R&Dを実施した結果、冷却水を用いない乾式ダイヤモンドワイヤーソーにより、一括切断が 可能であることを見出し、この2分割を実現した。なお、このダイヤモンドワイヤーソーは、 直径約10mmのワイヤーを通すことができれば、作業員は遠隔操作で切断可能であり、安全性 も高い工法である。これらの解体工法を用いて解体作業を進め、TF コイルの吊り出し、真空容 器の吊り出し等の主要作業を進め完了することができた。本報告書は、JT-60本体装置を中心 に解体全般についてまとめたものである。

### 2.JT-60 解体の作業内容

### 2.1 JT-60 概要

JT-60 は、本体装置などの主要部で直径約 15m、高さ 13m、重量約 5,000 トンになる国内最大 のトカマク型核融合実験装置である(図1)。本体装置は、核融合反応を起こすために必要な高温 プラズマ条件を実現するため、内部に高純度の水素或いは重水素を充填する真空容器、強磁場 によりプラズマの閉じ込めや位置制御を行う TF コイルや PF コイルの大型コイル、コイルによ る電磁力や地震で発生する応力に対して真空容器やコイル自身を支持する架台等から構成され る(図 2、図 3)。本体装置の主な材質は、TF コイルケースは高マンガン鋼、PF コイルは無酸 素銅、真空容器はインコネル材、星形トラスビームや支持柱等の支持構造物は高マンガン鋼で ある。また、本体装置は、電磁力等に対して耐えうるように装置の各部位は、溶接により補強 対策が施されている。そのため、前章で触れたように本体装置の解体では、通常の解体作業に 先立ち、これらの補強対策箇所の加工を行う必要がある。また、本体装置の周辺には、真空容 器内を超高真空に排気する真空排気設備などの本体付帯設備、プラズマの温度を上げるための 加熱装置として中性粒子入射加熱装置(NBI)と高周波加熱装置(RF)、プラズマの温度等の性能や 挙動を計測する計測装置など、種々の周辺設備が本体装置を取り囲むように配置されている。 このため本体装置の解体に当っては、先ずこれら周辺設備から解体・撤去する必要がある。な お解体においては、これらの機器が放射化されているとともに、真空排気ライン配管など内表 面には、重水素同士の核融合反応により発生したトリチウムが付着している可能性を踏まえて 放射線管理を行いながら作業を行う必要があった。

### 2.2 解体のための切断作業

JT-60 本体解体においては、電磁力等に対して機械的な強度を補強するために溶接されてい た補強部の切断が大きな課題であった。すなわち殆どの溶接箇所は、高マンガン鋼の支持構造 物同士をはめ合いで固定する所であり、結果的にその切断は狭隘部で実施する必要があった。 TF コイルの解体にあたっては、この狭隘部で補強溶接された2個1組の TF コイルを1体のま まで廻し込みながら吊り出すことは技術的に困難であると判断されたため、TF コイルを1個づ つ切り離してから吊り出すことを解体の前提とした。このため、すべての溶接部を予め切断す る必要があった。次に、1個ずつ分離した TF コイルをドーナツ状の真空容器から抜き取るため には、真空容器(+PF コイル)の 20 度セクター分を切り取り、TF コイルを抜き出すためのスペ ースを作っておく必要がある。真空容器は外側に TF コイルがあるため、切り取り部は真空容 器内側から分割して切断し(真空容器自身はより裕度を取って 40 度セクター分を切断)、真空容 器内部に引き込む必要があった。この真空容器の外側表面には保温材があり、保温材が飛散し ないような切断手法が必要であった。その次に PF コイルの切断に移行した。PF コイルは5種 類、計 45 断面ブロックからなり、真空容器の外側を取り巻くように取り付けられている。TF コイルを吊り出すためには、20度分の PF コイルを切断・搬出する必要があるが、ブロック数 が多いことから、その切断作業の短縮化が求められていた。加えて真空容器のポートについて は、TF コイルを回し込む際に干渉するため、事前に真空容器から切断しておく必要があった。

ー方、TF コイル撤去後には、切り取った 20 度セクター部以外の残った真空容器(約40トン) +PF コイル(約280トン)の吊り出しが必要となる。建屋クレーンの性能から吊り上げる総重量 が250トン以下になるように2分割する必要があった。さらに45 ブロックのPF コイルは、高 マンガン鋼の支持構造体を介して真空容器の外側に取り付けられており、この真空容器とPF コイルの一体構造物を2分割するには、インコネル、銅+絶縁材、高マンガン鋼の複合材の切 断手法を見出す必要があった。

### (1) TF コイル補強溶接部の切断

TF コイル(約70トン/個、全部で18個)は、2個1組で上下2箇所のトカマク中心側狭隘部を 幅60mmX 深さ50mmX 長さ1000mm に亘って補強溶接していることから、TF コイルの解体に はこの補強溶接部を先に切断する必要があった。特に、TF コイルの構造体は、強力な電磁力に 耐えうるため超硬度材(難削材)である高マンガン鋼であり、狭隘部でこの高マンガン鋼を切断 することが求められた。火気を用いた切断方法は、狭隘部では溶融金属を吹き飛ばすことがで きないことから、機械的なフライス切断を行うこととした。ただし狭隘部であるため汎用のフ ライス加工機をそのまま取り付けることはできず、分解して持込んだ後狭隘部で再組立てが可 能な専用の小型フライス加工機を開発する必要があった(図4)。フライス切断においては、加 工時の振動を抑える充分な剛性を持たせるとともに、作業員が直接、切断箇所を見ることがで きない狭隘部での切断に対して、TV モニタを付帯させる等の工夫を行った。更にフライスの 刃については、切れ味と損耗を実際のTF コイル切断で確認しながら、入手可能な種類のなか で最適化を図った。具体的には超硬エンドミルが最も高マンガン鋼の切断には有効であった。 この結果、1箇所の切断時間は約9日間(上側平均:7日間、下側平均:11日間)で実施できた。

### (2) 真空容器 40 度セクター分の切り取り

真空容器は、難削材であるインコネル(625)6mm 厚の板材を2枚用いた二重構造であり、外側 には TF コイルがあるため切断は内側から行い、切断片は真空容器の内部に引き込む必要があ った。火気手法は、真空容器外側のコイルの絶縁材(エポキシ+ガラス繊維)等に引火する危険 性があり採用できないため機械的な切断手法を用いた。この際、真空容器外側表面にはセラミ ック系の保温材が装着しており、保温材まで切断するとセラミック粉末が飛散し、TF コイルに 囲まれた狭隘部では洗浄が困難となることから、保温材を切断しないで真空容器のみを切断す ることが求められた。このため、位置検出センサーを有し曲面形状に沿って切断深さを精密に 管理できる専用のフライス機を導入することでこの課題を解決し、真空容器 40 度セクターを4 分割して、真空容器内部に引き込むことを実現した(図 5)。

### (3)真空容器ポート切断

TF コイルを真空容器から吊り出すためには、真空容器に溶接されているポートを先に切断す る必要がある。この切断においてもポートの外側にはセラミック系の保温材が装着しているこ とから、真空容器内側からポート筒のみを切断することとし、真空容器切断と同様に切断厚み を制御しながら切断してセラミック粉末の飛散防止を図った。 (4) ポロイダル磁場コイルの切断

真空容器 40 度セクター分を切り取った後は、次に PF コイル 20 度分を真空容器外側から切 |断し取除いた。PF コイルは銅バーに絶縁材を巻いた多層構造で、総数 45 ブロックが真空容器 を取り囲むように配置されている。最も太い PF コイルの断面は約 35cm×約 45 cmであり、通常 のセーバーソーでは切断長さが足りず、切断長さが 50 cmのギロチンソーという特殊な鋸機構を 用いて切断を試みた。しかしながら1つのコイルの切断に1週間程度もかかり、作業期間の短 縮が大きな課題となった。これに対して、冷却水を全く使用しない乾式ダイヤモンドワイヤー ソーを導入し、PF コイルの一括切断を試みたところ、極めて短期間(約5日間:切断のみの正味 時間)で PF コイルブロックの切断(2 線切)に成功した。ダイヤモンドワイヤーソーは、切断物の 大きさや形状に依存することなく使用が可能で、ワイヤーソーと各種プーリー、駆動モーター から構成され、プーリーのセッティングにより任意の部位からの切断ができる。乾式ダイヤモ ンドワイヤーソーのコイル切断(銅バー+絶縁材)の実績が無かったので、先に試験体を用いて 切断能力の確認をし、最終的に実機切断を回転速度 20m/s で実施して実現した。切断が進むに つれ張力が変化するが、常時モーターの電流値にてフィードバック制御を行い、調整用プーリ ーがワイヤーソーを張る方向に移動し、常に一定張力を維持しながら切断を行う(図5)。冷却 水を使用しないので、切断の切粉については放射化物を含む排水処理の必要がなくビニール養 生と掃除機で切断後の清掃が可能であり、作業時間の短縮、合理化ができる。更には作業員が 切断箇所に居る必要もないことから怪我、被ばくの可能性も低く、極めて有効な切断手法であ ることが明らかとなった。

(5)「真空容器+PF コイル」の2分割

TF コイル解体後の真空容器+PF コイルの解体に当たっては、JT-60 製作時と逆手順の方法で 真空容器と PF コイルを分離する案も考えたが、この場合、TF コイルを抜き取るための 20 度 セクター部の切り取りと同様に、真空容器の切断と 45 ブロックの PF コイルの切断に加えて、 36 箇所の PF コイルの支持構造体や真空容器のポート等の追加切断が必要となり作業期間の長 期化が懸念された。このため、銅製 PF コイルの効果的な切断を実証した乾式ダイヤモンドワ イヤーソーで、さらにインコネル(真空容器)、高マンガン鋼(PF コイル支持構造体)等の 材料も切断可能であれば、「真空容器+PF コイル」の一括切断が可能と考えた(図 5)。このた め、試験体で切断性能を確かめたところ、高マンガン鋼の切断時間は銅に比べ 2 倍程度遅くな るものの、技術的に適用できることを確認し、実機で「真空容器+PF コイル」の一括切断(1 線切)を試みた。この結果、ダイヤモンドワイヤーソーの損耗は、PF コイル単体の切断に比べ 3 倍程度となり、途中 3 回交換する必要があったものの、約 7 日間(切断のみの正味時間)で一括 切断を実現した。この値は、真空容器の 40 度セクターを内側からフライスで切断した時に要し た時間の約 1/4 であり、極めて効率の良い有効な切断手法であることを示した。

2.3 放射線管理

JT-60 は、18 年間の重水素実験で発生した中性子(積算 1.5×10<sup>20</sup> 個)により放射化している。本

解体は、核融合実験装置が放射線障害防止法の下で行う最初のケースである。解体作業は、放 射線障害防止法及び予防規定に基づいて実施し、大きなポイントは、切断作業に伴う切粉等の 飛散を防止し作業者の内部被ばくを防ぐとともに、解体品を適切に保管管理することであった。 さらに、作業に当たり、本体室内の領域区分(JT-60 トカマク中心から I ~IVの 4 領域)を行い、 放射化レベルが最も高い真空容器近傍の領域 I では、作業員の滞在時間を極力短くするととも に、領域 I の SUS 材(<sup>60</sup>Co が支配的)に関しては保管容器に入れた上で保管専用の建屋に保管、 それ以外の領域(II ~IV)から出た解体品は保管容器に入れ保管専用の用地に保管するなど、領 域に対応して保管管理を行った。(図 6)。

### (1)作業時の管理

機器の切断が必須となる解体作業においては、切断時に発生する放射化した切粉や切断片等 の飛散防止に努めるとともに作業者等に対する内部被ばく等の防止が重要である。そのため、 作業者には作業内容に応じた適切な防護具を装着させるとともに、作業の種類毎に作業エリア を明確に区分した。加工が伴う作業(切断、溶断等)と加工が伴わない作業(スパナ等)は、養生方 法や防護具が異なるために混在させない。また、加工が伴う作業は空気汚染が伴うもの(熱によ る加工の溶断、プラズマ切断)、伴わないもの(鋸等による機械切断)があり、養生方法が大きく 異なる。鋸等による機械切断は、切粉の管理が全てであり、養生した作業エリア外に飛散させ ない管理を行う。熱による加工は、グリーンハウスまたはそれに準ずる養生にて、局所排気装 置を設け負圧管理の下作業を行う。実際の作業において、作業場所が狭隘で確実な養生ができ ない場合は、可能な限りシート等で養生を行い、さらにその周辺部まで養生を拡大し、そこで 完全に切粉を押さえ込むことにした。さらに、作業者が切断の作業エリア外に出る場合は、原 子力機構の放射線管理担当員等が作業者の身体サーベィを行い汚染がないことを確認する等の 方法を取った。

### (2)解体品の収納保管

JT-60 トカマクの解体品は、管理区域からの解体となるため全ての解体品は、放射線測定を 行った上で、那珂核融合研究所内にある管理区域内に原則、放射化物として保管する。この解 体品は、JT-60SA で再据付するもの(約 600 トン、約 1,000 点)と、再据付する可能性が低いもの (約 4,800 トン、約 12,000 点)がある。再据付する可能性が低い解体品は、大きいものから小さ いものまで多種多様であり、効率良く収納するため、専用の保管容器と密閉容器を用いた。保 管容器は市販の海上コンテナ(20 フィート、40 フィート)を用い、密閉容器はトリチウム汚染の 可能性がある真空配管等を収納するためのもので、保管容器(20 フィート)を密閉構造に改造し たものである。保管用地は、放射化した解体品を入れた保管容器専用の保管場所で約 950 トン が保管されている。JT-60 機器収納棟は、本体装置等の大型機器を中心に約 3,850 トンが保管さ れている。一方、JT-60SA で再据付けする解体品は、JT-60 発電機棟 MG 室他にて主に NBI 加 熱装置等約 600 トン(約 1,000 点)が保管されている(図 7)。 (3)解体品の保管管理方法

解体品の保管は、放射化物としての厳重な管理は言うまでもなく、将来のクリアランスも考慮した情報管理も重要である。特に、JT-60SA で再据付けする可能性が低い多くの解体品は、使用履歴の異なる機器を大量に保管容器または密閉容器に収納し一定期間保管することになる。そのため、将来においても放射化物の情報が容易に照合できるシステム(保管管理システム)を構築し、その情報を確実に保管する必要がある(図 8)。JT-60 解体では、1 つの機器でも切断分解された機器毎に一つの単位として管理した。また、同じ種類の再使用品同士を固縛したり、ドラム缶等の容器に格納した場合は、その纏まりごとにタグ番号を発行し管理した。そのため、そのタグ番号により保管管理システムのデータベースから個々の情報が確認できる<sup>1)</sup>。

(4)保管管理システム

再据付けする可能性が低い解体品に関しては、全ての情報を計算機で管理するために保管管理システムを開発した。保管管理システムは、保管管理システムサーバー内に解体品情報をデータベース化し、そのデータベースの閲覧や保管管理台帳を作成したり、解体品のタグ番号又はバーコードスキャナーを用いて、そのものの情報を抽出する機能を有する。解体品情報の登録や閲覧、出力は、ローカルエリアネットワーク(LAN)に接続されたクライアント PC から Web ブラウザ(Internet Explorer 等)にてアクセスできるようにした(図 8)<sup>1)</sup>。

### 3.JT-60 解体作業の進捗

3.1 解体スケジュール

2012 年(H24 年度)の下旬に欧州(スペイン)から新たに組立が始まる超伝導核融合実験装置 JT-60SA の基礎部となるクライオスタットベースが搬入される予定であったため、同年の中旬 までに本体室中心部を更地化した。解体作業は、単年度契約であり作業の継続を考慮しながら 実施する必要があった。図9にJT-60 解体工程を示す。本体装置の解体の流れ(図10)に示すよ うに、1つ目の大きなマイルストーンは、TF コイルの吊出し・撤去(H23 年度内)であり、TF コ イルを撤去するために、各設備の解体を逐次進めて干渉機器がなくなった状態で TF コイルを 撤去した。2つ目のマイルストーンは、真空容器を軽量化(2分割)した後の吊り出し・撤去(H24 年7月)であった。以下に各年度の作業内容を詳しく述べる。

3.2 2009年(H21年度)の解体作業

2009年は、解体準備作業として、解体を効率的に進めるための前処理を行った。目的は、解体機器を搬出するための空間確保として、本体室と組立室を仕切っている遮へい壁と負イオン中性粒子入射加熱装置(N-NBI)高電位テーブルの分解、移動であり、その他に、周辺機器(本体付帯設備、計測装置、RF加熱装置)で解体に干渉する機器の一部を分解し移動させた(図11)。 さらに、自営解体として、原子力機構職員により真空容器内の第1壁タイルの取り外しと各装置の電源・制御ケーブル、冷却水配管、圧縮空気配管等のユーティリティーを切り離すアイソ レーション作業等を実施した。特に、第1壁タイルの取外しは、真空容器の切断に先立って行 う必要があるが、作業には真空容器内タイル位置、取り付け状況、取扱方法等を熟知している ことが求められる。そのため、外部業者に依頼せず自営で、真空容器内全面に張られている総 数12,000枚の保護タイル取り外しを約70日間(総人工数約700人日)かけて実施した。第1壁タ イル部は、JT-60装置の中でも放射化レベルの高いエリアであり、作業に当たり日々の被ばく 管理が重要であった。そのため、綿密な作業計画と管理にて、作業を効率良く行い、作業者の 被ばくが局所的に集中することなく平均化するように配慮した<sup>2)</sup>。

### 3.3 2010年(H22年度)の解体作業

2010 年前半は、本体装置の解体が控えており、本体装置の解体へスムースに移行するため、 本体装置を取り巻いている周辺機器を中心に解体を行った。上部の大型機器である計測架台を 移動し、ペレット入射装置やガス循環系配管等の本体付帯設備、RF 加熱装置(LHRF ランチャ ー)、NBI 加熱装置架台(配管ヤグラ、5F ステージ)等周辺部の大型機器を解体した(図 12)。 後半は、本体装置、NBI 加熱装置の本格的解体と残った周辺機器の一部の解体を行った。

本体装置は、TF コイル補強溶接部と真空容器ポート部の切断を開始した。また、本体装置の 転倒力を吸収していた装置上部の支持構造物である星型トラスビームの解体も行った。TF コイ ル補強溶接部と真空容器ポート部の切断は、第2章で詳しく述べたように専用のフライス加工 機を開発し、実機での動作等の検証試験も兼ねて行った。特に下側の TFC 補強溶接部は、上部 よりもさらに狭隘なスペースに小型で機械剛性のある回転切削機を設置する必要があったが、 一体での取付けが困難であるため、一度分解して溶接部に持ち込みそこで再度で組立ながら切 断を行う等の工夫をした(図 13、図 14)。

### 3.4 2011年(H23年度)の解体作業

2011 年が解体のメインの年であり、特に TF コイルの解体を完了させることが大きな目標で あった。前半は TF コイルの解体に干渉する機器の切断作業を確実に進めた。2010 年からの TF コイル補強溶接部と真空容器ポート切断を継続しつつ、上架台、上スペーサーの解体を適宜進 めた(図 15)。更に、TF コイルを廻し込むために干渉する PF コイル支持体ストッパーの切断を 実施した。PF コイル支持体ストッパーは、PF コイルが外側に動かないように上スペーサー面 に当てて固定するもので、材質が高マンガン鋼で TF コイルを挟み込むように設置されている。 これらの切断は、中ぐり盤とダイヤモンドワイヤーソーを併用して行った(図 16)。

TF コイルを吊り出す空間(20 度セクター分)は、第2章で紹介したように、真空容器と PF コ イルを切断して作り出した。真空容器の切断には、作業性と外部保温材の飛散防止を考慮し、 真空容器の内部から曲面形状に沿って切断可能な専用のフライス機を開発して行った(図 5)。PF コイルの切断は、真空容器切断後、乾式ダイヤモンドワイヤーソーにて 45 ブロックに及ぶ PF コイルを一括で切断した(図 17)。

PF コイルの切断は、真空容器切断後、乾式ダイヤモンドワイヤーソーにて 45 ブロックに及ぶ PF コイルを一括で切断した TF コイルの吊り出しは、真空容器ポート部及び PF コイルとの干 渉を確認しながら慎重にクレーンにて 1 台ずつ吊り出しを行った(図 18)。吊り出した TF コイ ルは組立室で専用の運搬冶具に固定し、JT-60機器収納棟に輸送した。

JT-60 機器収納棟は、解体品の主要部品の再組立を行い保管できるように設計建設されたものであるが、今回の再組立てに合わせて再度基礎工事を行った。再組立は、ベースとなる基礎の架台を従来の下架台ではなく、上架台を天地して下架台として用いた。これは、解体手順により上架台から解体が始まり、下架台が解体されるのが終盤であったため解体工程上、先に解体された上架台を基礎に用いて作業の合理化を図ったものである(図 19)。

### 3.5 2012 年(H24 年度)の解体作業

解体の最終年度にあたる 2012 年には、TF コイル解体完了後の状態から本体室中心部を更地 化して完遂までを行った。H24年度のメイン作業は、TFコイルを撤去した真空容器と PFコイ ルの一体構造を2分割することである(図20)。建屋クレーンの定格荷重(250トン)を越えないよ うに、真空容器と PFC を一体で切断し軽量化する必要があった。真空容器と PF コイルは、TF コイルが解体撤去されたことにより専用の受台上に置かれている状態であり、地震対策でワイ ヤロープにて固定はしてあるが、ボルト等で確実に固定している状態ではない。そのため、強 い外的な衝撃を与えることなく作業を進める必要があった。切断時の保温材の飛散に対しては、 TF コイルが撤去済であり充分な作業空間を確保できることから、切断箇所に養生ハウスを設置 し飛散防止を図った。この一括切断は、極めて良好であり、約1週間で真空容器等の2分割を 実現し、専用のフライス機に比べて約1/4に期間を短縮することを可能とした(第2章参照)。切 断により重心位置が変化した真空容器は、専用吊り治具(吊り天秤、スリング)にて一方の真空 容器に触れることなくバランスを保持しながら吊り出し、組立室に仮置きした。その後、真空 容器内部は、トリチウム汚染の可能性があるため、ポートを含む切断面の全てをステンレス板 材で溶接閉止により密閉状態とし、大型トレーラー(スーパーキャリア)にて保管場所の JT-60 機器収納棟に運んだ(図 21~図 27)。JT-60機器収納棟においては、建屋クレーンの定格荷重(100 トン)を越えるので、組立式の油圧で駆動する門型クレーン(スーパーリフト)にて大型トレーラ ーから吊り上げ設置した。その他、真空容器解体後に構造物である支持柱類、下架台、基礎架 台を解体したまた、並行して周辺設備で残っていた基礎架台内の PF コイルフィーダや計測と RF 加熱装置架台の解体も行った。(図 28、図 29)。以上の解体を経て、平成 24 年 10 月までに 本体室中心部は更地となり、また、JT-60機器収納棟にも解体品が保管され、長年に亘る JT-60 解体は完遂した (図 30)。

### 4.解体作業における作業分析

JT-60 解体は、日欧共同の国際協力である JT-60SA 計画に基づく工程が予め確定しており、 限られた期間と予算内で進める必要があった。特に本体装置の解体に不可欠な切断作業は、放 射線障害防止法の下に切粉の飛散と作業者の内部被ばく防止を図りながら安全でかつ効率良く 作業を進めることが重要となった。更に、JT-60 解体は、メーカーに発注する契約形態が単年度 契約(一般競争契約)であったため、長期に亘る作業を分割して発注する必要がある。このため 作業開始前には、JT-60の過去の作業経験や今回の各 R&D の結果を充分検討し、本体装置は無 論、周辺の機器に至るまで詳細な解体工程表を検討して、年度毎の契約を行った。このような 作業により、受注メーカーに対して効率的な解体作業を指示し、限られた期間で解体を完遂す ることができた。

実際の解体作業においては実績工程からも分かるとおり切断作業が工程を決めた (図 31)。更 に本体装置の解体作業量としても切断作業は、全体の約4割を占め、この作業を効率良く実施 することが、JT-60 解体の鍵であった (図 32)。すなわち狭隘空間で重量物を切断する場合、目 視確認の困難さ、切断直後の応力開放による切断物の急な移動等、危険が伴うため、そのリス クを下げる手法が求められる。さらに真空容器近傍では、作業員の被ばくを軽減するためには、 作業員の真空容器近傍での滞在時間を短くすることが求められる。このため今回の解体では、 対象機器に応じて、分解・組立が容易で狭隘部に取付可能な小型フライス加工機や切断深さを 管理できる専用フライス加工機等を投入した。これにより、切断時の切粉の飛散を抑えながら 高マンガン鋼やインコネル等の難削材の切断を実現した。TF コイルを撤去した解体後半では、 切断箇所に養生ハウスを設置し、乾式ダイヤモンドワイヤーソーにより真空容器と PF コイル の一括切断を実現した。特にこのダイヤモンドワイヤーソーは、10mm のワイヤーが通る空間 を確保すれば、機器の大きさ・形状に依存せず難削材の一括切断が可能であり、工程短縮(専 用フライスと比べ約 1/4)と安全確保(作業員は切断箇所に近づかなくても可能であり、巻き 込まれ、被ばく等の危険が無い)に大変有効であることを実証した。今後、こうした解体の経 験や実績は、核融合分野以外の複雑な機器・設備の切断作業においても適用が期待できる。

### 5.まとめ

JT-60SA 建設に向けた JT-60 本体の解体作業は、2009 年(H21 年度)の自営による真空容器内 の約 12,000 枚の第一壁タイルの撤去等の解体準備に始まり、2010 年(H22 年度)前半の周辺機器 解体、2010 年(H22 年度)後半の本体装置・NBI 加熱装置解体、2011 年(H23 年度)の本体装置の 主要機器である上架台(約 250 トン)、トロイダル磁場コイル(TF コイル:約 80 トン/個、全 18 個)の解体作業を終了し、各々を JT-60 機器収納棟に保管した。最終年の2012 年(H24 年度) には、真空容器(約 40 トン)+ポロイダル磁場コイル(PF コイル:約 280 トン、支持体込み) を一括で2分割に切断、吊り出し後、JT-60 機器収納棟に保管するとともに、下架台(約 200 トン)、基礎架台(約 170 トン)の解体、保管を行い、3 年に亘って行ってきた解体総重量約 5,400 トンに達する JT-60 トカマク本体及び周辺設備の解体作業を完了した。

JT-60 の解体作業は、放射線障害防止法の下での最初の核融合実験装置の解体であったが、適切な切断手法や放射線管理手法を導入することで、長期に亘る解体作業を無事故・無災害で終えることができた。

### 謝 辞

本報告書をまとめるに当り、長年に亘る JT-60 解体の無事故・無災害にての完遂にご尽力頂 いた原子力機構及び解体実施メーカー[㈱日立製作所、日本アドバンストテクノロジー㈱]の関 係者の皆様に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- 1)西山友和 他: "JT-60 解体に伴う放射化物解体品の保管管理", 平成 22 年度熊本大学総合技術研究会報告集(CD-ROM),11P-240, (2011).
- 2) 柳生純一 他: "JT-60 解体に伴う内部タイルの取外し報告", 平成 22 年度熊本大学総合技術 研究会報告集(CD-ROM),11P-241, (2011).

2019		実験	がて、「「」」で、「」」」で、「」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」
2018			
2017			
2016		+ 高式馬剣 -	
2015	知ら		
2014			イ
2013			
2012			
2011	略体		
2010			je za za
2009	横備		
2008		協定発动	
2007		BA	9- H
年	• 組立	• 運転	
	解体	高式馬炙	NBI加熱 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一

サテライトトカマク計画

**⊻1** 

日欧協力で実施する幅広いアプローチ(BA)活動のサテライトトカマク計画として、JT-60を解体し、超伝導トカマク JT-60SAIC改修 核融合エネルギー50万kWを出すITERの目標達成のための支援研究







図4 TFコイル補強溶接部の切断







本体室における領域管理 図(2)

К





解体品の管理方法 8 ⊠

					ິ ເມີດ	<mark>/</mark>		
	24 年度	意理			H24年度 数州7 4834		約12m 加 17-60SA用基礎架 (欧州から搬入) H24年度下旬	
	23 年度	放射化物の管			H23 年度 501年	<b>斯体</b>		1 <i>–1</i> /
慮しながら実施。	22 年度		解体		H22 年度 作業準備	♥満	H234 B¥	JI-PU00群4インショ
◆体至屮心部を史凹℃。 約であり作業の継続を考Ⅰ	21 年度	中国的	解体準備	遮蔽壁	解体検討	NNBI 電源		ぶ れ
4年度中国までに、、 本作業は、単年度契3		幾構(自営)		周辺部	本体&	加熱装置等		
□ □ □ □ □		¥	業	者にょ	6 10 5	鮮 体	Real Provide American Americ	

● H24年度下旬に、欧州からクライオスタット基礎部が搬入予定。
 ● H24年度中旬までに、本体室中心部を更地化。
 ● 解体作業は、単年度契約であり作業の継続を考慮しながら実施。



図10 JT-60本体装置の解体の主なフロー

### JAEA-Technology 2013-031



図11 2009年の作業

### JAEA-Technology 2013-031



## 図12 2010年(前半)の解体作業



2010年(後半)の解体作業(1)

図13

1.TFC補強溶接部(上側)切断

### JAEA-Technology 2013-031



# 図14 2010年(後半)の解体作業(2)

- 24 -



1.上架台の解体

### JAEA-Technology 2013-031







3.PFCの切断(TFC吊り出し部)



- 28 -



5.TFコイルの再組立(JT-60機器収納棟)

図19 2011年の解体作業(5)



その後に密閉処理を行う。

●真空容器・PFCの解体

2012年の解体作業の概要 꾗20 1.JT-60真空容器の約140個に及ぶポートの閉止作業(SUS板をTIG溶接)



小口径ポートの閉止

大口径ポートの閉止

図21 2012年の解体作業(1)

### JAEA-Technology 2013-031



### 図22 2012年の解体作業(2)

養生ハウス(ハウス内にダイヤモンドワイヤーソーを設置)

●切断前の真空容器内部

2.真空容器の切断準備





- 34 -





切断面(TC-17側)下側の閉止板

図25 2012年の解体作業(5)

5.真空容器の閉止作業



### 図26 2012年の解体作業(6)

真空容器(Bブロック)の搬出



7.真空容器の搬入(JT-60機器収納棟)

図27 2012年の解体作業(7)

真空容器(Bブロック)の固定

### JAEA-Technology 2013-031



### 図28 2012年の解体作業(8)

- 38 -



本体装置の周辺にある大型架台類の解体を行なった。 P8、P9ヤグラは2分割し、JT-60機器収納棟グリーンハウスにて細断を行い保管容器に収納した。

9.計測・RF加熱装置の架台の解体



JT-60解体作業終了時点の本体室の風景



10.JT-60解体作業の完了

JT-60解体作業終了時点のJT-60機器収納棟の風景

図30 2012年の解体作業(10)



図31 解体の実績工程



表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
盔半里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例		
和辛雪	SI 基本単位			
和立里	名称	記号		
面 積平	方メートル	$m^2$		
体 積立	法メートル	$m^3$		
速さ,速度メ	ートル毎秒	m/s		
加速度メ	ートル毎秒毎秒	$m/s^2$		
波 数每	メートル	m <sup>-1</sup>		
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>		
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>		
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg		
電流密度ア	ンペア毎平方メートル	$A/m^2$		
磁界の強さア	ンペア毎メートル	A/m		
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>		
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>		
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$		
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (	数字の) 1	1		
比透磁率(b)	数字の) 1	1		
(a) 量濃度 (amount concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度		
(substance concentration) トキトげれる				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組工単位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m	
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2	
		sr II-	1	m m -1	
同 仮 多		пг		S .	
カ	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>	
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd	
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>	
吸収線量 比エネルギー分与					
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>	
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2	
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms	
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol	

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かけ性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>	
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA	
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> e <sup>-1</sup> mol	

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с	
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р	
$10^{6}$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^{3}$	+ 1	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а	
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z	
$10^{1}$	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美験的に侍られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダ	N	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

### 表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値	
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa	
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa	
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m	
海		里	М	1 M=1852m	
バ	-	ン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>	
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネ	-	パ	Np	CI単位しの粉値的な間接け	
ベ		N	В	対数量の定義に依存。	
デ	ジベ	ル	dB -		

### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$		
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>·1</sup>		
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」				

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 属	<b>禹さないその他の単位の例</b>
	名称				SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\sim$	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	-トル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています