

JT-60SAクエンチ保護回路の欧州による 現地据付・調整試験と作業安全管理

Work and Safety Managements for On-site Installation,
Commissioning, Tests by EU
of Quench Protection Circuits for JT- 60SA

山内 邦仁 岡野 潤 島田 勝弘 大森 栄和
寺門 恒久 松川 誠 小出 芳彦 小林 和容
池田 佳隆 福本 雅弘 櫛田 浩平

Kunihito YAMAUCHI, Jun OKANO, Katsuhiro SHIMADA, Yoshikazu OHMORI
Tsunehisa TERAKADO, Makoto MATSUKAWA, Yoshihiko KOIDE, Kazuhiro KOBAYASHI
Yoshitaka IKEDA, Masahiro FUKUMOTO and Kouhei N. KUSHITA

核融合研究開発部門

那珂核融合研究所

トカマクシステム技術開発部

Department of Tokamak System Technology

Naka Fusion Institute

Sector of Fusion Research and Development

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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

JT-60SA クエンチ保護回路の欧州による現地据付・調整試験と作業安全管理

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所
トカマクシステム技術開発部

山内 邦仁、岡野 潤、島田 勝弘、大森 栄和、寺門 恒久、松川 誠、
小出 芳彦、小林 和容、池田 佳隆、
福本 雅弘⁺¹、櫛田 浩平⁺²

(2015 年 12 月 18 日 受理)

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、核融合エネルギーの早期実現のための幅広いアプローチ（BA）活動の一環として、那珂核融合研究所（那珂研）内に超伝導のサテライト・トカマク装置（JT-60SA）を建設している。JT-60SA 計画は、日本の実施機関である原子力機構と欧州の実施機関である Fusion for Energy（F4E）が物納貢献により共同で進める国際事業である。欧州側では超伝導トロイダル磁場コイルの他、磁場コイル用電源の主要機器や極低温システム等を分担するが、F4E の総括のもとで各国の指定研究機関が欧州のメーカーと契約し、その欧州のメーカーが那珂研での現地据付・調整試験までを行う。このため、原子力機構にとっては直接の契約がないにも係らず、欧州の作業員に対する作業管理や安全管理を行わなければならないという課題があった。

本報告は、JT-60SA 計画において、欧州の作業員による最初の那珂研での現地作業であるクエンチ保護回路の据付・調整試験を遂行するにあたって、欧州側との事前の交渉の結果として合意し、構築・実施した作業管理や安全管理の取組み、およびそれらをもとに完遂した欧州作業についてまとめたものである。

Work and Safety Managements for On-site Installation, Commissioning, Tests by EU of Quench Protection Circuits for JT-60SA

Kunihito YAMAUCHI, Jun OKANO, Katsuhiko SHIMADA,
Yoshikazu OHMORI, Tsunehisa TERAKADO, Makoto MATSUKAWA,
Yoshihiko KOIDE, Kazuhiro KOBAYASHI, Yoshitaka IKEDA,
Masahiro FUKUMOTO⁺¹ and Kouhei N. KUSHITA⁺²

Department of Tokamak System Technology
Naka Fusion Institute, Sector of Fusion Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2015)

The superconducting Satellite Tokamak machine “JT-60SA” under construction in Naka Fusion Institute is an international collaborative project between Japan Atomic Energy Agency (JAEA) as the Implementing Agency (IA) of Japan (JA) and Fusion for Energy (F4E) as the IA of Europe (EU). The contributions for this project are based on the supply of components, and thus European manufacturer shall conduct the installation, commissioning and tests on Naka site under the general supervision by F4E via the designated institute in each EU nation. This means that JAEA had an issue to manage the works by European workers and their safety although there is no direct contract.

This report describes the approaches for the work and safety managements, which were agreed with EU after the negotiation, and the completed on-site works for Quench Protection Circuits (QPC) as the first experience for EU in JT-60SA project.

Keywords: JT-60SA, Quench Protection Circuit, EU, On-site Work, Safety, Management

+ 1 Department of Administrative Services

+ 2 Nuclear Human Resource Development Center

目 次

1. はじめに	1
2. JT-60SA クエンチ保護回路の概要	1
2.1 クエンチ保護回路の機能と動作原理	1
2.2 PF コイル用クエンチ保護回路	2
2.3 TF コイル用クエンチ保護回路	5
2.4 調達取決め	5
3. 欧州作業のための事前準備と安全管理	6
3.1 国内法規・必要資格等の整理及び所内規則等の英語版の整備	6
3.2 作業管理体制	9
3.3 安全標識整備	9
3.4 保安教育訓練	9
3.5 情報共有体制	10
4. 現地作業	11
4.1 現地作業場所	11
4.2 現地作業実績	15
4.3 据付	17
4.4 調整試験	19
5. おわりに	24
謝辞	24
参考文献	24
付録 1 欧州作業員のための保安教育訓練（第 1 部）資料	25
付録 2 欧州作業員のための保安教育訓練（第 2 部）資料	33

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of JT-60SA Quench Protection Circuits	1
2.1 Function and Principle	1
2.2 Quench Protection Circuit for PF Coil	2
2.3 Quench Protection Circuit for TF Coil	5
2.4 Procurement Arrangement	5
3. Preparation and Safety Management for EU Works on Site	6
3.1 Survey of Domestic Laws/Regulations and Required Licenses, and English Translation of JAEA Rules	6
3.2 Management Organization for On-site Works	9
3.3 Replacement of Safety Signs	9
3.4 Safety Training	9
3.5 Information Sharing System	10
4. On-site Works	11
4.1 On-site Work Area	11
4.2 Records of On-site Work	15
4.3 Installation	17
4.4 Commissioning and Tests	19
5. Concluding Remarks	24
Acknowledgements	24
References	24
Appendix 1 Presentation Material of Safety Training for EU Workers (Part 1)	25
Appendix 2 Presentation Material of Safety Training for EU Workers (Part 2)	33

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）那珂核融合研究所（那珂研）では、臨界プラズマ試験装置（JT-60）計画を遂行してきた。JT-60 は世界最大級のトカマク型核融合実験装置として 1985 年に運転を開始して以来、装置改造を経て 1996 年に臨界プラズマ条件を達成、さらに核融合エネルギー増倍率、イオン温度、電子温度、核融合積等において世界最高値を記録するなど、世界の核融合研究開発を牽引してきた。その後、JT-60 装置は 2008 年に運転を完遂し、超伝導コイルを使用したサテライト・トカマク装置（JT-60SA）¹⁾への改修に向けて 2010 年度から 2012 年度にかけて解体²⁾された。

JT-60SA 計画は、核融合エネルギーの早期実現のための幅広いアプローチ（BA）活動の一環として、日本の実施機関である原子力機構と欧州の実施機関である Fusion for Energy (F4E) が物納貢献により共同で進める国際事業である。既存の JT-60 施設を最大限活用するため、那珂研に建設され、2019 年 3 月にファーストプラズマおよび運転開始を予定している。欧州側では超伝導トロイダル磁場コイルの他、磁場コイル用電源の主要機器や極低温システム等を分担するが、F4E の総括のもとで各国の指定研究機関が欧州のメーカーと契約し、その欧州のメーカーが那珂研での現地据付・調整試験までを行う。このため、原子力機構にとっては直接の契約がないにも係らず、欧州の作業員に対する作業管理や安全管理を行わなければならないという非常に難しい課題があった。

本報告は、JT-60SA 計画において、欧州の作業員による最初的那珂研での現地作業であるクエンチ保護回路³⁻⁶⁾の据付・調整試験を遂行するにあたって、欧州側との事前の密な交渉の結果として合意し、構築・実施した作業管理や安全管理の取組み、およびそれらをもとに完遂した欧州作業についてまとめたものである。具体的には、これらの取組みの結果、欧州作業員によるクエンチ保護回路の現地据付調整作業を無事故で完遂させることができ、日欧双方にとって非常に大きな成果となった。欧州側からも、原子力機構のこうした取組みに対する高い信用・信頼が寄せられており、日欧の協力体制の一層の強化・活性化につながっている。このため、クエンチ保護回路に続く欧州作業である極低温システムの据付調整作業でも、ここに述べる作業管理と安全管理がそのまま採用されている。

2. JT-60SA クエンチ保護回路の概要

2.1 クエンチ保護回路の機能と動作原理

JT-60SA は超伝導トカマク型核融合実験装置であり、トロイダル磁場 (TF) コイルおよびポロイダル磁場 (PF) コイルには、発熱の無い超伝導コイルを採用する。超伝導コイルは電気抵抗がゼロであるため、平均電流密度を高く設定できるという利点を有するが、何らかの要因で通電中に超伝導状態を維持できなくなって常伝導状態に移行してしまった場合（これをクエンチと言う）、高電流密度であるが故に発生するジュール熱で超伝導コイルが損傷してしまう。このため、クエンチが起きた場合は即座に通電を停止する、すなわちコイル内部に蓄積された磁

気エネルギーを速やかに外部に放出させる必要がある。クエンチ保護回路（Quench Protection Circuit ; QPC）はこのための保護装置であり、それぞれの超伝導コイルに備える必要がある。

JT-60SA の QPC の動作原理を図 1 に示す。通常は、直流電流遮断スイッチが閉じられており、単なる電路として機能している。超伝導コイルに設置されたクエンチ検出回路でクエンチを検出すると、QPC に対して動作指令が出力される。動作指令を受信した QPC は、直流電流遮断スイッチの開動作を行い、バイパスしていた主回路電流を遮断する。この結果、それまで直流電流遮断スイッチを流れていた電流は放電抵抗器（ダンプ抵抗器）に転流し、磁気エネルギーは熱エネルギーに変換される。すなわち、コイル電流は急速に減衰することとなる。なお、直流電流遮断スイッチのバックアップとして、爆薬で緊急動作するパイロブレーカが直列に接続しており、直流電流遮断スイッチの故障あるいは遮断失敗時には、パイロブレーカにより確実に電流を遮断・転流させる。

JT-60SA の TF コイルと PF コイルの電流定格および蓄積エネルギーは異なる。このため、QPC もそれぞれに合わせて設計製作された。次小節にそれぞれの特徴をまとめて示す。

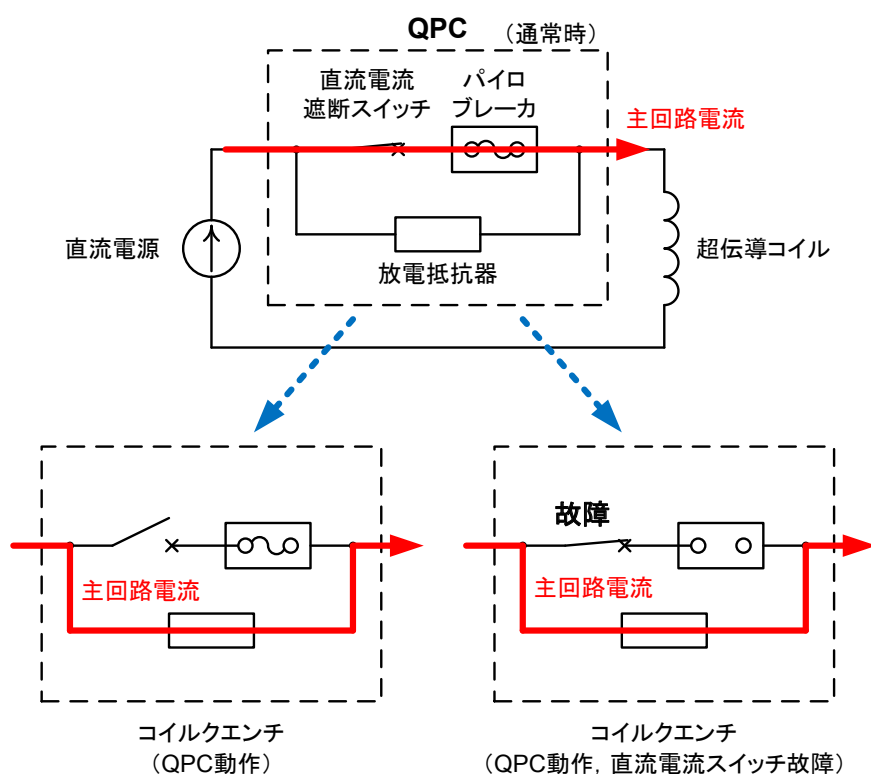


図 1 QPC の動作原理

2.2 PF コイル用クエンチ保護回路

PF コイル用電源は、既存の JT-60 の銅コイル（常伝導コイル）用電源の一部を改造し、そこに欧州が新規製作する電源機器を組合せて整備するものである。図 2 に代表的な JT-60SA の PF コイル用電源の回路図（平衡磁場コイル EF1 用）を示す。長時間定格の低電圧直流電源（超伝導コイルベース電源）、プラズマの着火・立上げにのみ使われる短時間定格の高電圧発生回路

(ブースター電源またはスイッチング・ネットワーク・ユニット) および QPC で構成され、コイルごとに若干の仕様の違いはあるものの、基本的な回路構成は共通である。このうちのブースター電源やベース電源用変圧器の大部分を除いて、新規製作電源機器は主に欧州（イタリア／フランス）が調達を担当しており、順次、那珂研に搬入され据付けられる予定である。

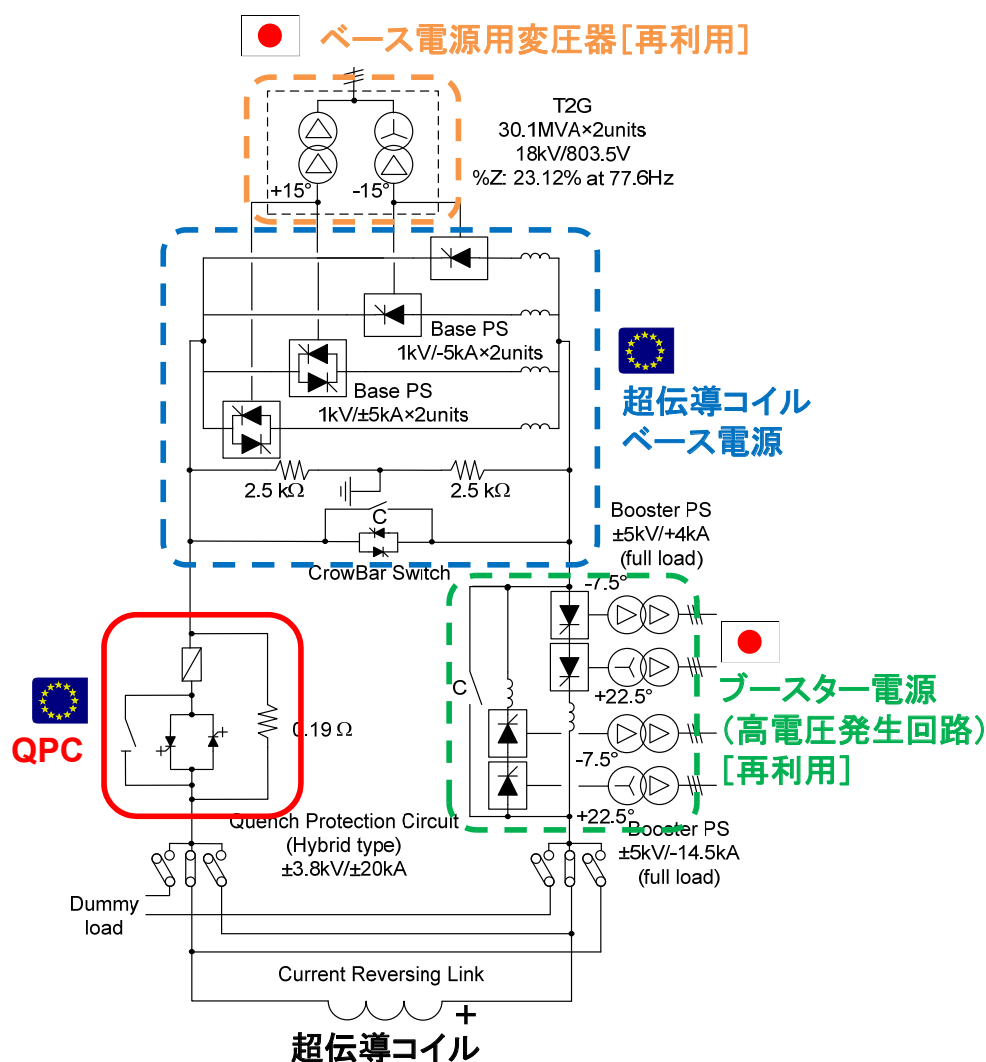


図2 JT-60SA の PF コイル用電源の回路図 (EF1 用)

PF コイル用 QPC の主な仕様を表 1 に示す。JT-60SA の PF コイルは、4 つの中心ソレノイド (CS) と 6 つの平衡磁場 (EF) コイルの合計 10 個のコイルで構成され、それぞれ独立の電源により運転される。このため、QPC も各 PF コイルに対し 1 ユニット設置される。10 個の PF コイルは、それぞれターン数や大きさ、通電パターンが異なるため、自己インダクタンスおよび蓄積される最大の磁気エネルギーも異なる。このため、PF コイル用 QPC では定格消費エネルギーの異なる 3 種類の放電抵抗器を用意して対応している。ただし、その他の構成機器については全て共通である。

表 1 JT-60SA 用 QPC の主な仕様

項目		値	
		PF コイル用	TF コイル用
定格／最大電圧		3.8 kV / 5.0 kV	1.93 kV / 2.8 kV
定格／最大電流		20 kA / 22.5 kA	25.7 / 25.7 kA
遮断電流		22.5 kA (両極性)	25.7 kA (片極性)
ユニット数		10	3
放電抵抗公称値 (20 °C)		0.19 Ω	0.075 Ω
絶縁定格		7.2 kVrms	3.6 kVrms
時間定格		250 s 通電 / 30 min 周期	連続
動作指令信号受信からの動作遅延時間		0.35 s	
パイロブレーカ動作遅延時間		1 ms	
クエンチ検出後からのコイル最大許容 I^2t		2 GA ² s	4.6 GA ² s
放電抵抗器定格消費エネルギー	CS1	70 MJ	—
	CS2	100 MJ	—
	CS3	100 MJ	—
	CS4	70 MJ	—
	EF1	200 MJ	—
	EF2	200 MJ	—
	EF3	70 MJ	—
	EF4	200 MJ	—
	EF5	100 MJ	—
	EF6	200 MJ	—
	TF1	—	350 MJ
	TF2	—	350 MJ
	TF3	—	350 MJ
QPC 動作から運転再開までの最大待機時間		30 min	1 h
冷却方式	パイロブレーカ	純水冷却	
	放電抵抗器	自然空冷	

2.3 TF コイル用クエンチ保護回路

図 3 に JT-60SA の TF コイル用電源の回路図を示す。TF コイルは同一仕様の 18 個の要素コイルから成り、それらと欧州（フランス）が調達を担当する連続定格の 1 ユニットの直流電源および 3 ユニットの QPC が直列に接続される。各 QPC は、6 つの要素コイル群と交互に配置され、これにより QPC 動作時の TF コイルの対地電圧上昇を 1/3 に抑えている。TF コイル用 QPC の主な仕様も同じく表 1 に示されている。QPC の機器構成は、前小節の PF コイル用とほぼ同様である。ただし、大きな相違点としては、電流極性が通電中に変わらないことから電力用半導体素子を使った静止型遮断器が両極性ではなく片極性であることと、各放電抵抗器が非接地ではなく中点接地されていることが挙げられる。

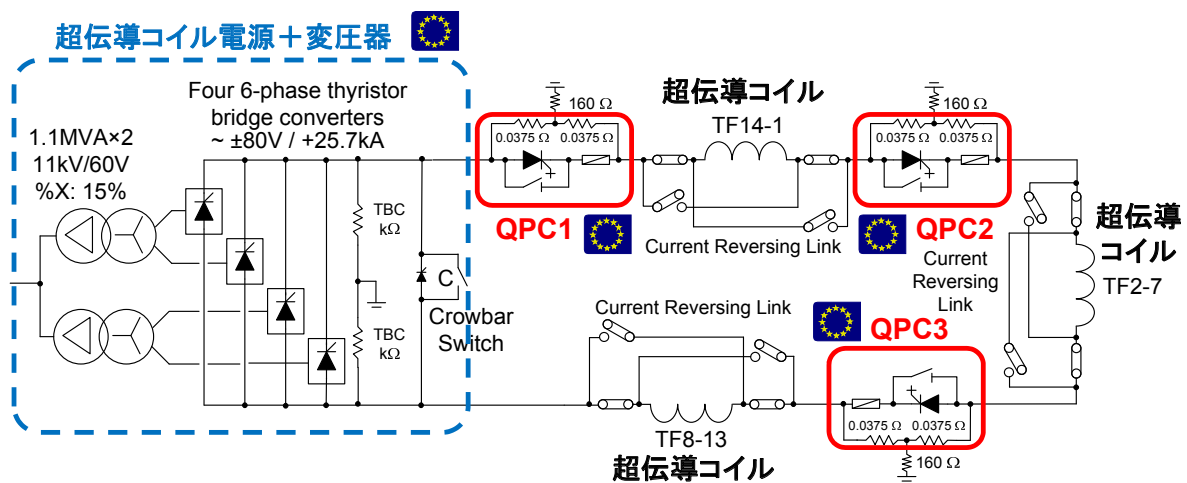


図 3 JT-60SA の TF コイル用電源の回路図

2.4 調達取決め

JT-60SA 計画は、日本の実施機関である原子力機構と欧州の実施機関である F4E が物納貢献により共同で進める国際事業である。分担する機器ごとに原子力機構と F4E とが調達取決め（PA）を締結し、QPC については計 13 ユニット（PF コイル用 10 ユニット、TF コイル用 3 ユニット）全て欧州の分担である。欧州では、F4E の下に共同実施協定を結んだ各国の指定研究機関が存在し、さらに、指定研究機関が欧州のメーカーと契約している。QPC の場合、指定研究機関としてイタリアの Consorzio RFX 研究所が指定されており、同じくイタリアの Nidec ASI S.p.A.社が製作から現地据付・調整試験までを受注している。以上の各機関の相関関係をまとめて図 4 に示す。

QPC の PA スケジュールは図 5 のようになっている。2009 年 3 月に PA が発効され、約 6 年に及ぶプロジェクトの最終段階が現地据付・調整試験である。

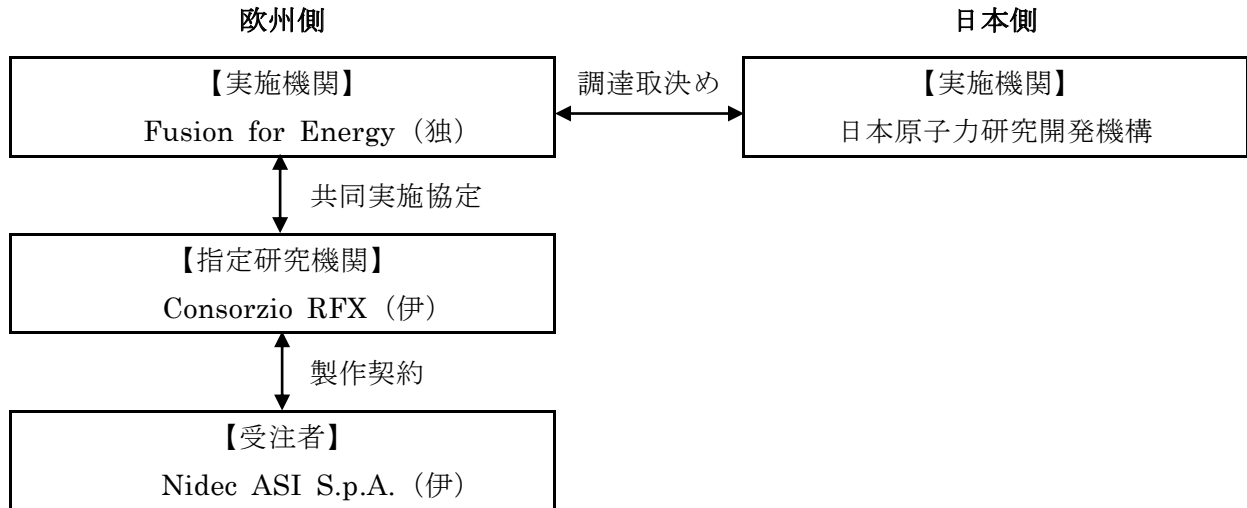


図 4 QPC 調達のための各機関の相関関係

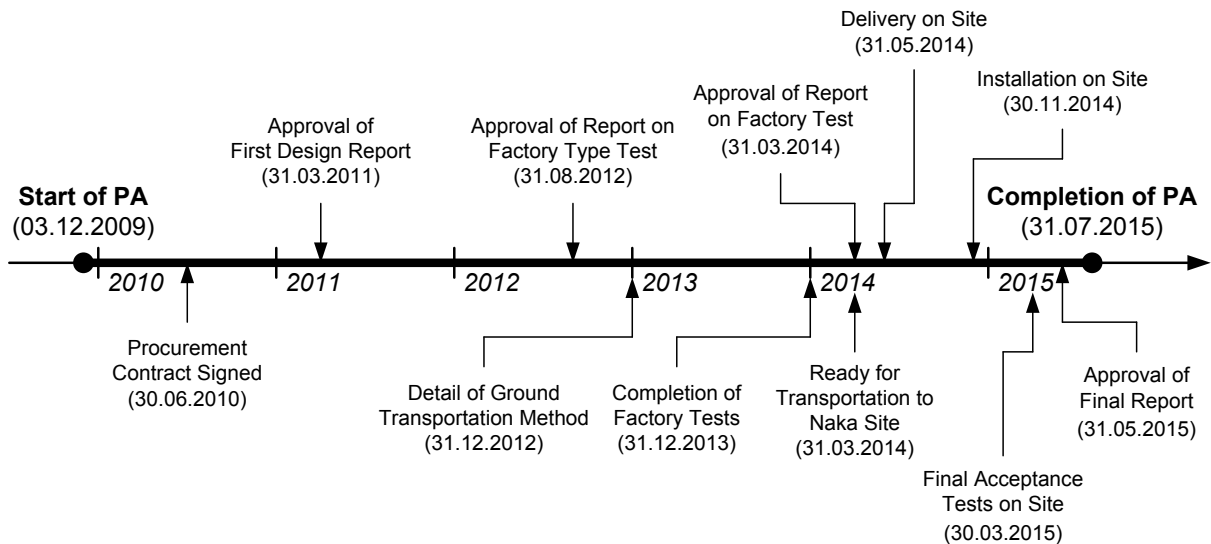


図 5 QPC の PA スケジュール

3. 欧州作業のための事前準備と安全管理

本節では、那珂研で欧州の現地作業を開始するにあたり、事前に行った各種準備や安全管理について記述する。

3.1 国内法規・必要資格等の整理及び所内規則等の英語版の整備

欧州の作業員であっても、実際の作業場所が日本国内となる以上、日本の法令や基準に従わざるを得ない。さらに、那珂研にはそれらの法令を確実に遵守するために定められた所内規則があり、その規則の下にさらに JT-60 施設における要領等が定められている。

欧州による現地作業に先立ち、想定される作業の分析を行い、適用される国内法規や所内規則などを整理するとともに、所内規則等を英文化した。図 6 に、国内法規および英文化した所内規則・要領等の関係図を示す。基本的には、所内規則は国内法規を遵守するようにできているので、欧州側には所内規則・要領等に従ってもらうことで了解を得た。なお、国内法規に関しては、法務省の日本法令外国語訳データベースシステム上でかなりのものが英語に翻訳（ただし、日本語の原文のみが法的効力を有する）されているので、関係法規の URL を紹介し、必要に応じて参照してもらうこととした。

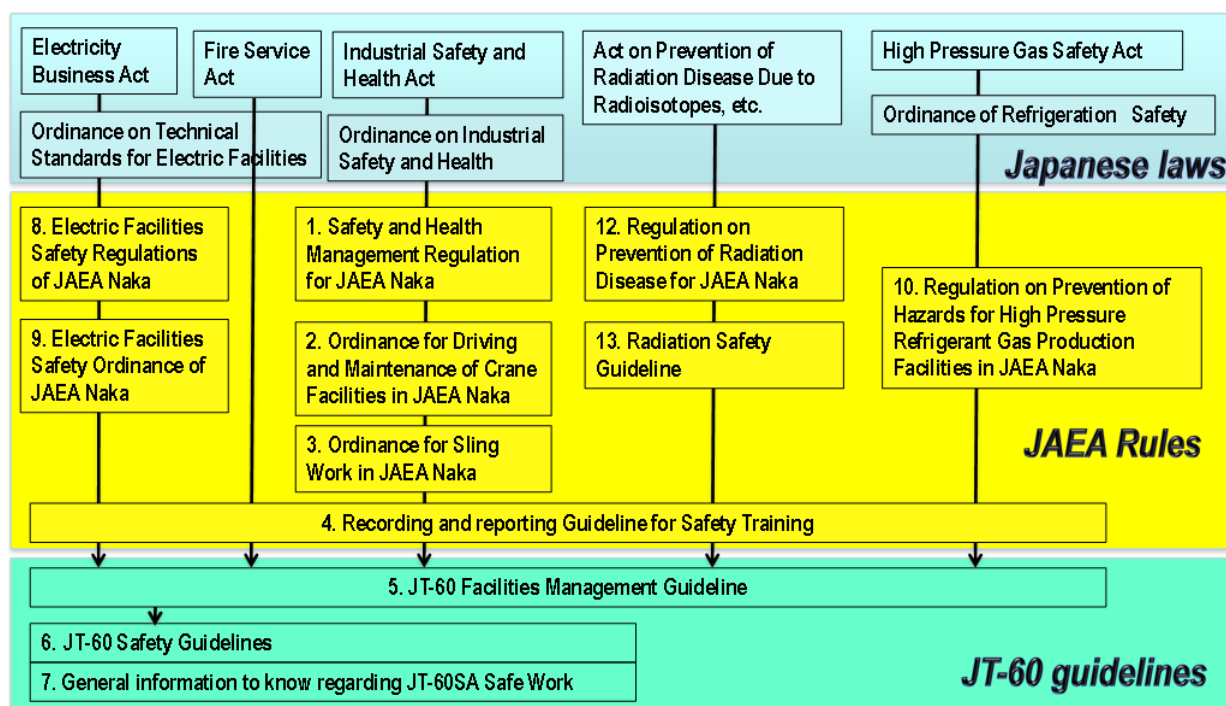


図 6 国内法規および英文化した所内規則・要領等の関係

QPC の現地作業に適用される国内法規は主に労働安全衛生法と電気事業法である。このうち、労働安全衛生法に関しては、QPC の現地作業に必要な作業と資格等を整理すると表 2 の通りとなる。据付作業においては、最大で 3 t の機器を移動・固定するため、資機材や廃材（梱包材等）の搬出入でクレーン作業員および玉掛け作業員の資格等が必要となる。また、主回路は高圧の充電電路に該当するので、機器間配線・接続で主回路に関するものについては高圧・特別高圧電気取扱業務に係る特別教育を作業従事者に対して行うことが義務づけられている。しかし、欧州の作業員にこれらの特別教育や技能講習を受講することを求めることは難しい。なぜなら、英語で受講できる講習会などは皆無なのが実情である。このため、欧州側には現地作業の条件と必要な資格等を説明し、資格等が不要な作業は 50 V 以下の電気作業に限定されることを明示したうえで、据付作業に関しては日本国内の下請け業者を使ってもらうことで了解を得た。加えて、据付が完了した後の調整試験においても、一部作業で同様に資格等を必要とする場面があることから、下請け業者のサポートを常時付けてもらうこととした。ただし、所内で実施する安全衛生教育（保安教育訓練）については、全ての外来作業員に対して実施しな

ればならないため、後述の通り機構職員が英語で対応した。また、安全管理者や衛生管理者等の安全体制上の職務については、欧州作業員が常時 10 人未満であることから、労働安全衛生法による選任義務は生じない。

一方、電気事業法に関しては、電気事業者（東京電力）から特別高圧（275 kV）で受電する那珂研の場合、所内の電気工作物は全て自家用電気工作物として扱われ、電気主任技術者が保安監督を行うことになっている。言い換えると、電気主任技術者の裁量に全て任されている。那珂研の電気主任技術者と協議した結果、実際に製造しているメーカーの技術者が機器を最もよく理解している点を考慮し、欧州作業員については本国で有効な電気資格の証明書と経験年数に関する書類を必要に応じて提出することにより、電気事業法の観点からは現地作業に従事可能とすることで了解を得ている。

表 2 労働安全衛生法により QPC の現地作業で必要となる資格等

作業目的		作業内容	必要資格等
所内全作業			安全衛生教育
据付	資機材搬出入	クレーン作業(1 t 以上)	クレーン運転士／クレーン技能講習／クレーン運転の業務に係る特別教育
		玉掛け作業(1 t 以上)	玉掛け技能講習
	機器据付	玉掛け作業(1 t 以上)	玉掛け技能講習
	機器間の主回路配線・接続	高圧充電電路※ ¹ の敷設	高圧・特別高圧電気取扱業務に係る特別教育
	機器間の制御電源配線・接続	低圧充電電路※ ² の敷設	低圧電気取扱業務に係る特別教育
	機器間の信号配線・接続	低圧充電電路(50 V 以下)の敷設	不要
	輸送中に破損した主回路部品の交換・修理	高圧充電電路※ ¹ の修理	高圧・特別高圧電気取扱業務に係る特別教育
調整試験	耐電圧試験	高圧充電電路※ ¹ の敷設・点検・操作	高圧・特別高圧電気取扱業務に係る特別教育
	制御電源回路・補機類の調整試験	低圧充電電路※ ² の敷設・修理	低圧電気取扱業務に係る特別教育
	信号回路の調整試験	低圧充電電路(50 V 以下)の敷設・点検・修理・操作	不要

※1 直流 750 V 超かつ 7000 V 以下／交流 600 V 超かつ 7000 V 以下

※2 直流 750 V 以下(50 V 以下を除く)／交流 600 V 以下(50 V 以下を除く)

3.2 作業管理体制

調達取り決め（PA）は原子力機構と F4E の契約であり、原子力機構からは F4E のみが唯一の正式な交渉相手である。このため、F4E→欧州各国指定研究機関（EU VC）→欧州業者（EU Supplier）への責任・指揮系統が明確となるような作業管理体制（図 7）を提案し、欧州側と合意した。すなわち、原子力機構の現地作業管理者（On-Site work Manager; OSM）の指揮の下、欧州側は F4E、各国指定研究機関、欧州業者に現場代理人（On-Site Representative; OSR）／現場管理者（On-Site Manager; OSM）と安全管理者（Safety Officer; SO）を常駐させることで、原子力機構から実際の作業を行う欧州作業員（欧州業者）への迅速な連絡・指導を可能とするとともに、欧州側の責任体制を明確化した。

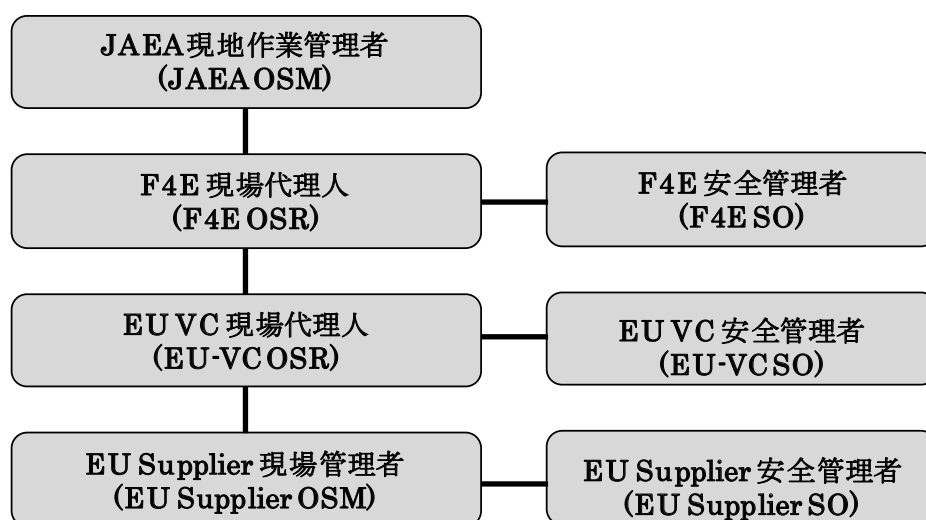


図 7 欧州の現地作業における管理体制

3.3 安全標識整備

欧州作業員的那珂研におけるヒューマンエラーの防止の観点から、これまで設置していた日本語の各種標識を調査し、特に安全確保に関するものを中心に英語標識を整備した。また、重複する表示をなくし、理解が容易となるように様式も可能な限り統一した。

3.4 保安教育訓練

労働安全衛生法／同規則および那珂核融合研究所 安全衛生管理規則により、那珂研で作業する全ての外来作業員に対し保安教育訓練（安全衛生教育）を実施しなければならない。このため、英語による保安教育訓練資料（付録 1 および 2）を作成するとともに、同資料を基に欧州作業員を対象とした保安教育訓練を実施した。なお、保安教育訓練は、一般的な内容の第 1 部と作業現場の特殊事情を重視した第 2 部に分けて 2 段階で行うことで、より実践的な教育訓練とした。図 8 に第 1 回の一般保安教育訓練の実施の様子、図 9 に作成した保安教育訓練資料の表紙、および図 10 に受講証明書の一例を示す。



図 8 保安教育訓練（第 1 回）の実施の様子

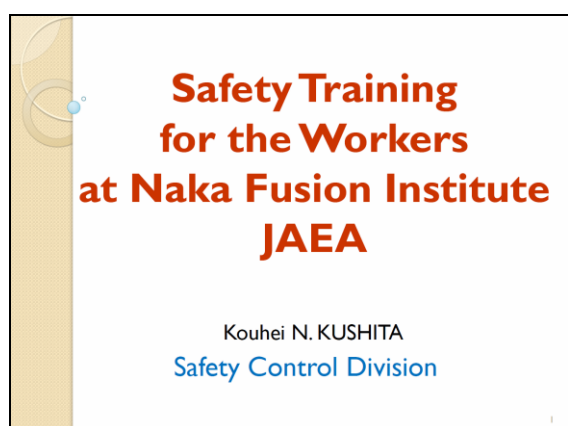


図 9 保安教育訓練資料



図 10 受講証明書

3.5 情報共有体制

作業現場では、欧州が実施する QPC の現地作業の他にも、既設の JT-60 用電源の一部改造や大電流フィードの新設など、日本（原子力機構）側で実施する作業がほぼ同時期に 10 件以上も並行する状況であった。このため、原子力機構としては、日々作業環境が変化する中で、欧州作業員と日本作業員の安全を確保しつつ、作業干渉を回避しながら着実な作業管理を行う必要があった。具体的には、情報共有の迅速化と徹底、および安全管理の責任所掌の明確化を図るため、以下を実施した。

・作業前

- | | |
|-----------------------|--|
| (1) メール配信システムの整備： | 最新情報を日欧関係者全員に一斉周知・共有 |
| (2) 工程調整会合の開催（週 1 回）： | 毎週金曜日に開催し、建屋内全作業の代表者と原子力機構担当で翌週の各作業計画の周知・共有と調整を行うことで、競合頻度の高い資機材搬入出を含む作業エリアの空間的・時間的区画の相互理解を徹底 |
| (3) 作業前ミーティングの開催： | 毎朝作業前に開催し、建屋内全作業の代表者と原子力機構関係者で当日の作業場所と作業内容、および工程 |

表の作業計画からの変更の有無等を確認し合うことで、作業時の安全確保を徹底

・作業中

(4) 無線ページングの貸与：

欧州（F4E、各国の指定研究機関、欧州業者）の各代表者と日本側作業の総括責任者に無線ページングの端末を貸与し、連絡手段として最大限活用することにより、情報伝達の迅速化かつ効率化を推進

4. 現地作業

4.1 現地作業場所

図 11 に那珂研における JT-60 施設、図 12~14 に QPC の現地作業場所（機器レイアウト）、表 3 に JT-60SA 超伝導コイル電源機器の設置場所一覧を示す。JT-60 整流器棟 2F に 8 ユニット、1F に 2 ユニット、JT-60 実験棟増設部 3F に 3 ユニットの QPC が設置される。なお、QPC と再利用されるブースター電源以外の機器については、今後設置される計画であるため、QPC の現地作業時点では存在していない。また、1 ユニットの QPC の機器配置の例を図 15 に示す。ユニットごとに放電抵抗器の数量やパイロブレーカ用冷却装置のレイアウトなどの多少に違いはあるものの、基本的な機器構成および機器配置は同じである。



図 11 JT-60 施設図

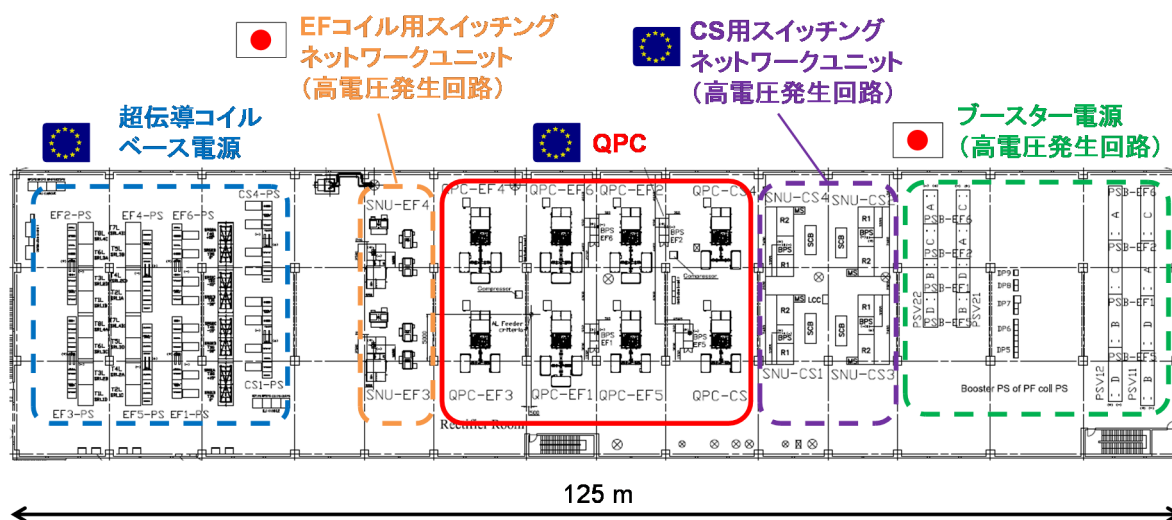


図 12 JT-60 整流器棟 2F における QPC の現地作業場所 (8 ユニットの機器レイアウト)

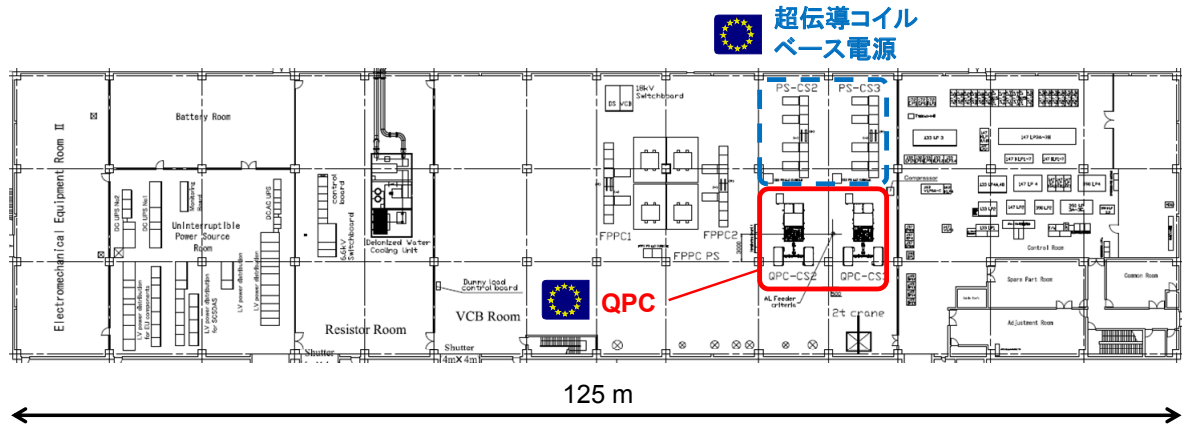


図 13 JT-60 整流器棟 1F における QPC の現地作業場所（2 ユニットの機器レイアウト）

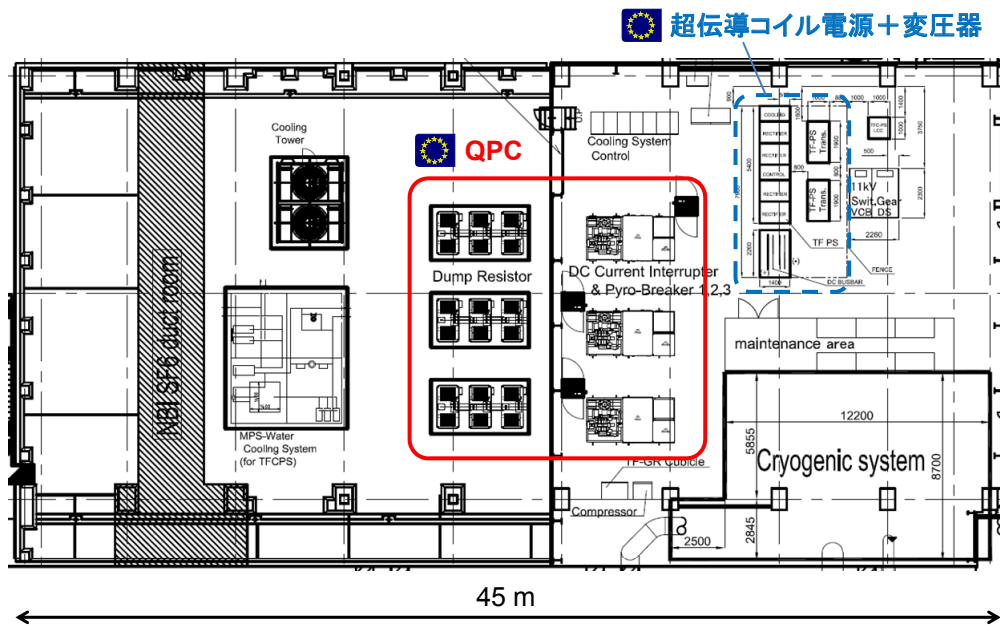


図 14 JT-60 実験棟増設部 3F における QPC の現地作業場所（3 ユニットの機器レイアウト）

表 3 JT-60SA 超伝導コイル電源機器設置場所一覧

設置場所	QPC	ベース電源	ブースター電源	SNU ⁽¹⁾
整流器棟 2F 整流器室	CS1	CS1	—	CS1
	—	—	—	CS2
	—	—	—	CS3
	CS4	CS4	—	CS4
	EF1	EF1	EF1	—
	EF2	EF2	EF2	—
	EF3	EF3	—	EF3
	EF4	EF4	—	EF4
	EF5	EF5	EF5	—
	EF6	EF6	EF6	—
整流器棟 1F VCB 室	CS2	CS2	—	—
	CS3	CS3	—	—
実験棟増設部 3F 能動粒子線電源室	TF1	TF ⁽²⁾	—	—
	TF2		—	—
	TF3		—	—

(1) スイッチング・ネットワーク・ユニット (SNU)

(2) 超伝導コイル電源

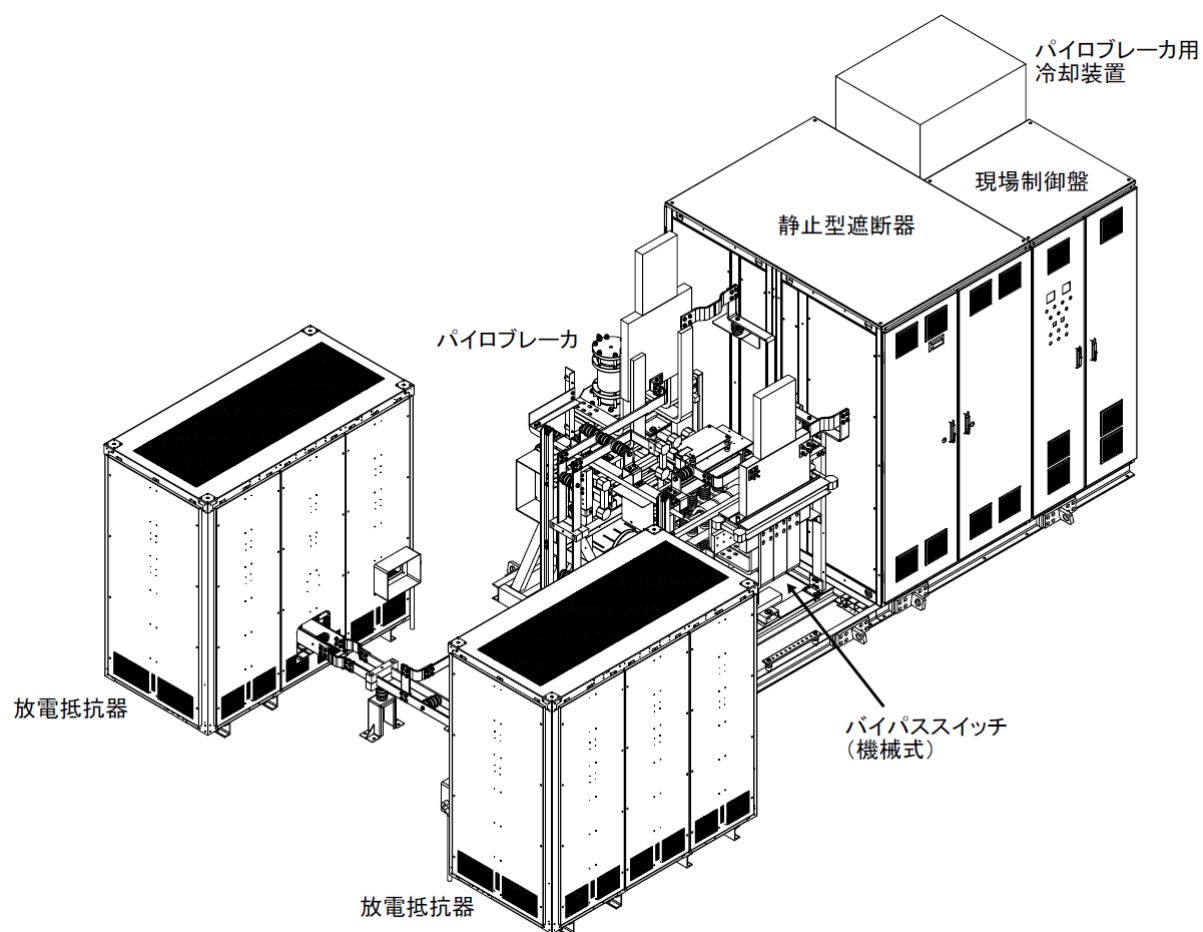


図 15 1 ユニットあたりの QPC の機器レイアウトの例 (PF コイル用)

4.2 現地作業実績

表 4 に QPC の現地作業における実績工程表、表 5 に QPC の現地作業に従事した欧州作業員の実績数を示す。QPC の現地作業は 2014 年 12 月 1 日に開始され、6.5 ヶ月の作業期間を経て 2015 年 6 月 12 日に完了した。また、計 12 人、延べ 345 人日の欧州作業員（日本の下請け業者を除く）が QPC の現地作業に従事した。

表 4 QPC 現地作業の実績工程表

年 月 週	2014												2015																		
	12												3																		
	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
JT-60実験棟増設部 3階 能動粒子線電源室																															
QPC TF1 据付																															
QPC TF1 調整																															
QPC TF1 試験																															
QPC TF2 据付																															
QPC TF2 調整																															
QPC TF2 試験																															
QPC TF3 据付																															
QPC TF3 調整																															
QPC TF3 試験																															
JT-60整流器棟 2階 整流器室																															
QPC CS1 据付																															
QPC CS1 調整																															
QPC CS1 試験																															
QPC CS4 据付																															
QPC CS4 調整																															
QPC CS4 試験																															
QPC EF1 据付																															
QPC EF1 調整																															
QPC EF1 試験																															
QPC EF2 据付																															
QPC EF2 調整																															
QPC EF2 試験																															
QPC EF3 据付																															
QPC EF3 調整																															
QPC EF3 試験																															
QPC EF4 据付																															
QPC EF4 調整																															
QPC EF4 試験																															
QPC EF5 据付																															
QPC EF5 調整																															
QPC EF5 試験																															
QPC EF6 据付																															
QPC EF6 調整																															
QPC EF6 試験																															
JT-60整流器棟 1階 VCB室																															
QPC CS2 据付																															
QPC CS2 調整																															
QPC CS2 試験																															
QPC CS3 据付																															
QPC CS3 調整																															
QPC CS3 試験																															

表 5 QPC 現地作業の欧州作業員実績数（日本の下請け業者を除く）

欧州機関	作業員数	
	実績（計画）	累積
Fusion for Energy (F4E)	3 人（4 人）	62 人日
EU VC (Consortio RFX)	4 人（4 人）	74 人日
EU Supplier (Nidec ASI)	5 人（7 人）	209 人日
計	12 人（15 人）	345 人日

4.3 据付

現地作業はまず QPC の機器を開梱するところから始まる。QPC の各機器は海上コンテナに入って日本まで船で輸送されるが、入国港（横浜港）に到着した後の通関を含む那珂研までの国内輸送は日本（原子力機構）側の分担である。したがって、最終据付位置近くの仮置き場所において、梱包状態のまま機器が再度日本側から欧州側に引渡される（図 16）。据付け用の部品類まで含めると、QPC の梱包は 80 箱以上あり、総重量で 140 t 超にも及ぶ。次節の調整試験と異なり、据付けの大半は重量物作業で、さらに 3.1 節で整理したように資格が必要な作業が少なからず含まれる。このため、据付けに関しては欧州業者の現場管理者 1 名と国内下請け業者の作業員 10 名超（ピーク時）からなる作業体制で実施された。具体的な作業手順は以下の通りである。

- (1) 開梱（図 17~18）
- (2) 主要機器の配置・固定（図 19~21）
- (3) 機器間配線・接続（図 22~23）
- (4) ケーブルトレイの設置（図 24）
- (5) 冷却水ホースの接続（図 25）



図 16 現地作業開始時の QPC 機器
（梱包状態で仮置き）



図 17 開梱中の QPC 機器



図 18 開梱後の QPC 機器



図 19 機器固定用アンカーボルト打設



図 20 据付け位置への QPC 機器移動作業



図 21 据付け位置に固定後の QPC 機器



図 22 放電抵抗器用ブスバーの組立



図 23 放電抵抗器用ブスバーの固定・接続

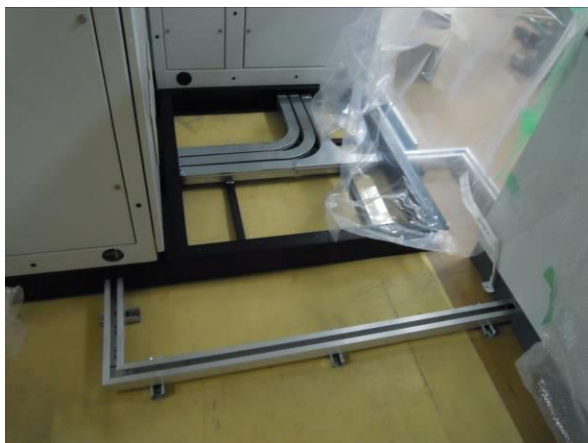


図 24 ケーブルトレイの設置



図 25 冷却水ホースの接続

4.4 調整試験

(1) 耐電圧試験

現地据付け完了後、放電抵抗器と QPC の主回路一括の耐電圧試験を行った（図 26～27）。図 28 に試験方法、表 6 に試験電圧を示す。当初、放電抵抗器単体では工場ルーチン試験で耐電圧試験を実施しているので、現地では主回路一括の耐電圧試験のみを行う計画であった。しかしながら、いくつかの放電抵抗器において、開梱後に接続端子の支持碍子の破損が確認されたため、これらを現地で交換し、工場ルーチン試験の耐電圧試験を再度実施した。また、碍子を交換しなかった放電抵抗器においても、接続端子が筐体から飛び出ている構造であること、輸送中もしくは輸送前の梱包時の端子への接触が破損の原因と思われることから、念のため再試験を実施することとした。結果は、放電等の異常も確認されず、正常に完了した。また、耐電圧試験の前後に行った絶縁抵抗測定においても、規定値内で変化がないことを確認した。



図 26 耐電圧試験（QPC 主回路一括）



図 27 絶縁抵抗測定（QPC 主回路一括）

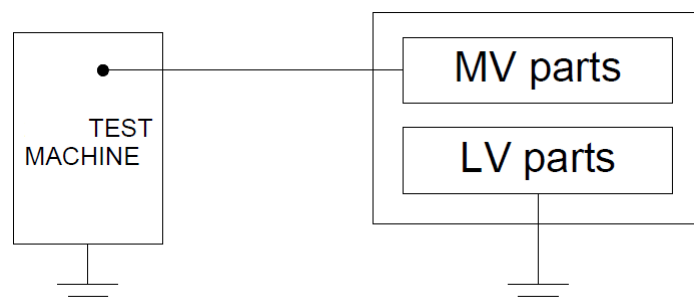


図 28 QPC 主回路一括耐電圧試験の試験方法（MV：主回路、LV：制御回路）

表 6 耐電圧試験の試験条件

試験対象機器	試験電圧		印加時間
	PF コイル用	TF コイル用	
放電抵抗器 (工場試験の再試験)	20 kVrms ⁽¹⁾		1 min ⁽¹⁾
QPC 主回路一括 (現地受入試験)	5.0 kVrms ⁽²⁾	2.8 kVrms ⁽²⁾	10 min ⁽²⁾

(1) IEC 60071 “Insulation Co-ordination”

(2) JESC-E7001 (2010) 「電路の絶縁耐力の確認方法」

(2) 耐水圧試験

パイロブレーカは水冷する必要があるため、QPC ごとに専用の純水冷却装置が用意されている。冷却装置および被冷却機器であるパイロブレーカ本体については、工場ルーチン試験で国際電気標準規格（IEC 規格）に基づいた耐水圧試験が行われているが、いずれも機器ごとの単体での試験である。また、冷却装置とパイロブレーカ本体の間のホースについては、長さ調整のために現地で加工していることもあり、耐水圧試験は未実施である。このため、据付け完了後、系統として完成した状態で一括の耐水圧試験を実施した（図 29）。表 7 に実施した耐水圧試験の試験圧力を示す。IEC 規格では該当する試験の規定がないため、JIS B8265「圧力容器の構造 — 一般事項」を準用し、設計圧力の 1.5 倍で試験することとした。ただし、イオン交換器については内部のイオン交換樹脂が 1.5 倍の圧力に耐えられないため、協議のうえ、1.0 倍で試験した後に前後のバルブを閉止してイオン交換器のみを切り離し、再度 1.5 倍で試験することで合意した。試験の結果、漏れや変形等もなく、正常に完了した。



図 29 耐水圧試験（系統一括）

表 7 耐水圧試験の試験条件

試験対象機器	試験水圧	保持時間
系統一括	4 bar (設計圧力×1.0 倍)	30 min
系統一括(イオン交換器を除外)	6 bar (設計圧力×1.5 倍 ^(*))	30 min

(*) JIS B8265「圧力容器の構造 — 一般事項」

(3) 調整運転・機能試験

耐電圧試験および耐水圧試験の完了後、欧州業者の制御システム担当の技術者 2 名および下請け業者のサポート 1～若干名による調整運転および機能試験が行われた（図 30～31）。QPC 周辺の制御電源ケーブルや接地線、2 次冷却水配管および圧縮空気配管等の布設は日本（原子力機構）側で行う取決めになっており、それらは QPC の欧州側作業が完了した後でなければ実施できないため、ここでは仮設の配管・配線等を欧州側に提供して調整試験を行ってもらった。

機能試験は大きく以下の 3 つの内容で構成されており、日欧で合意した全 114 項目を実施した。

- (a) 制御モジュールのハードウェアチェック
- (b) I/O 信号・警報の整合性チェック
- (c) シーケンス試験（有限状態機械／FSM の整合性チェックを含む）

調整試験中に制御用ハードウェアのいくつかが故障していることが判明したため、追加で輸入し交換を行った。また、パイロブレーカ用冷却装置のポンプ起動・停止時のノイズが電流計測器に重畳する問題が発生したため、ノイズフィルタ等の各種部品を取り寄せてその効果を検

証し、効果的な構成を全ユニットに反映させた。以上のような大小様々なトラブルシューティングを経て、最終的に全ての機能試験に合格した。

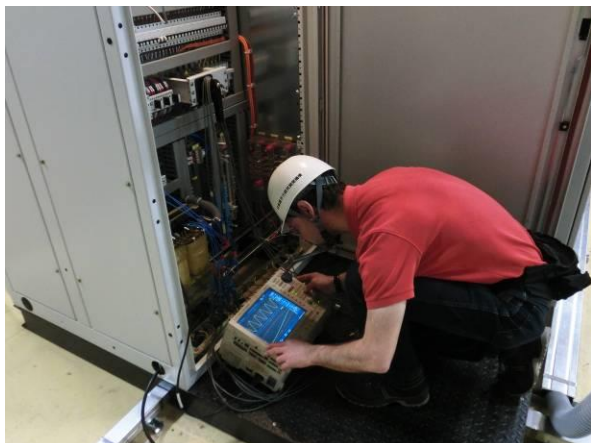


図 30 調整運転



図 31 機能試験

(4) 最終受入試験

調整運転および機能試験が全て完了した後、原子力機構の立会いによる最終受入試験が行われた（図 32）。最終受入試験では、日欧間の取合いであるリモート信号を使って制御システムの動作を確認するため、日本（原子力機構）が整備する上位の電源統括制御計算機を模擬したテストスタンドを事前に用意しておき、それを用いて試験を行った。

試験内容は、以下のように機能試験の中で重要度の高いものを抜粋して再度実施するものと、日欧間のリモート信号取合いの整合性チェックで構成され、日欧で合意した全 57 項目を実施した。

(a) 機能試験（抜粋再試験）

(b) リモート信号（日欧間の取合い信号）の整合性チェック

テストスタンドと連動させて JT-60SA 運転時と同様のシーケンスを走らせた結果、全てのユニットにおいて QPC の所定の動作が得られることを確認した。これには、通常の動作シーケンスはもちろん、その途中で QPC 内部に故障が発生した場合のバックアップシーケンスなども含まれている。なお、最終受入試験における通電試験は、電源や模擬負荷コイルが使用できなかった場合のみ実施する取決めであり、QPC の現地試験の時点では必要な機器が揃っていないため、実施していない。したがって、必要な機器が揃い次第、日本側で通電試験を実施する必要がある、今後の課題である。

最後に、現地作業完了後に撮影した QPC の設置エリア全体の写真（JT-60 整流器棟 2F）を図 33 に示す。最終受入試験の合格をもって、日欧の PA に基づく QPC の現地作業を 2015 年 6 月 12 日に全て完遂した。さらに、この結果を受けて、約 6 年にわたる QPC の PA が予定通り 2015 年 7 月 31 日に完了した。



図 32 最終受入試験



図 33 現地作業完了後の QPC (JT-60 整流器棟 2F)

5. おわりに

JT-60SA 計画において、欧州の作業員による最初的那珂研での現地作業であるクエンチ保護回路の据付・調整試験を遂行するにあたって、欧州側と事前に密な交渉を行い、作業内容や作業管理方法、安全管理の取組み等について合意した。その結果、欧州作業員によるクエンチ保護回路の現地据付調整作業を無事故で完遂させることができ、日欧双方にとって非常に大きな成果となった。欧州側からも、これらの原子力機構の現地作業安全の取組みに対する高い信用・信頼が寄せられており、日欧の協力体制の一層の強化・活性化につながっている。このため、クエンチ保護回路に続く欧州作業である極低温システムの据付調整作業でも、本報告にある作業管理と安全管理がそのまま採用されている。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、核融合研究開発部門 那珂核融合研究所 トカマクスシステム技術開発部 JT-60 電源・制御開発グループ員、JT-60 マグネットシステム開発グループ員、JT-60 安全評価グループ員、管理部 保安全管理課員の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1)Y. Kamada, P. Barabaschi, S. Ishida *et al.* :“Progress of the JT-60SA Project”, Nucl. Fusion, 53, 104010(2013).
- 2)Y. Ikeda, F. Okano, M. Hanada *et al.* :“Safe Disassembly and Storage of Radioactive Components of JT-60U Torus”, Fusion Eng. Des., 89, pp.2018–2023(2014).
- 3)E. Gaio, L. Novello, R. Piovan *et al.* :“Conceptual Design of the Quench Protection Circuits for the JT-60SA Superconducting Magnets”, Fusion Eng. Des., 84, pp.804–809(2009).
- 4)E. Gaio, A. Maistrello, A. Coffetti *et al.* :“Final Design of the Quench Protection Circuits for the JT-60SA Superconducting Magnets”, IEEE T. Plasma Sci., 40, pp.557–563(2012).
- 5)E. Gaio, A. Maistrello, M. Barp *et al.* :“Full Scale Prototype of the JT-60SA Quench Protection Circuits”, Fusion Eng. Des., 88, pp.563–567(2013).
- 6)A. Maistrello, E. Gaio, A. Ferro, *et al.* :“Experimental Qualification of the Hybrid Circuit Breaker Developed for JT-60SA Quench Protection Circuit”, IEEE T. Appl. Supercon., 24, 3801505(2014).

付 録 1 欧州作業員のための保安教育訓練（第1部）資料

(ver.4/2015)

Safety Training for the Workers at Naka Fusion Institute JAEA

Safety Section
Dep. of Administrative Services
NFI, JAEA

Contents

1. Introduction
2. Laws/Regulations/Acts
3. Safety in General at NFI
4. Safety for Special Works
5. Radiation Safety (*)
6. Emergency Measures
- Conclusion

(*This training is for the general workers who do NOT work in the controlled area.)

I. Introduction

-Japan Atomic Energy Agency-

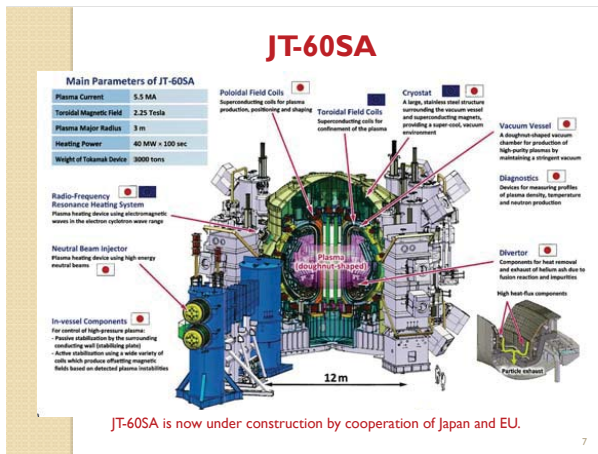
JAEA was originally established in 1956 as two nuclear-related institutes, which have been integrated into JAEA in 2005.

Routes to Naka Fusion Institute

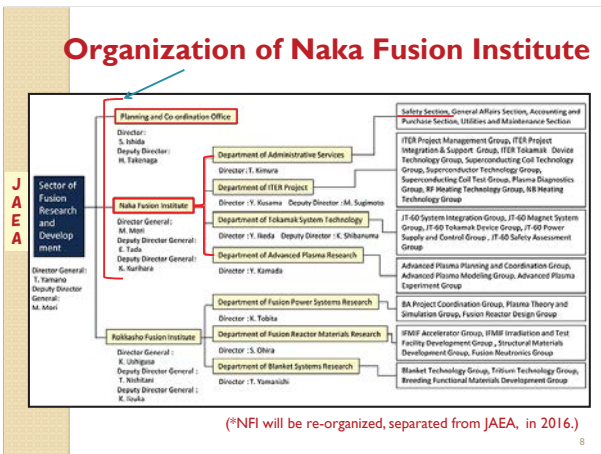
Naka Fusion Institute

Naka Fusion Institute (NFI) was established in 1985. A large tokamak device JT-60 and various fusion testing and research facilities are installed in the area of approximately 1 million square meters. Since 2012, JT-60SA has been under construction aiming the first plasma in 2019.

Map of Naka Fusion Institute



7



8

Department of Administrative Services

- (1) **Safety Section**
- (2) General Affairs Section
- (3) Accounting and Purchase Section
- (4) Utilities and Maintenance Section

- ① **Safety administration team**
 - general safety of staff&facilities, high pressure gas, emergency measure, environmental protection
- ② **Radiation control team 1**
 - personal radiation control, environmental radiation control, license, RI transfer, quality assurance,
- ③ **Radiation control team 2**
 - radiation protection and monitoring, detector maintenance, environmental radiation monitoring

9

Start of On-site Work (For the workers of BA activities)

36. All EU Supplier personnel^(*) have to complete the **training course** for the work at JT-60SA Site to be provided by JAEA OSM or his/her representative(s) (with particular regard to safety aspects, including conduct in case of emergency), inclusive of manuals and instructions (in both English and in Japanese) and obtain JAEA OSM's signature **certifying the completion of training course** before the start of on-site work. This training is to be performed in accordance with the "Recording and Reporting Guideline for Safety Training" (Naka Admin. Ordinance No.6 of 2005).

(*) including Japanese workers employed by EU Supplier.

10

Recording and Reporting Guideline for Safety Training

「保安教育訓練実施記録及び報告手引」

Training for visiting workers (外来作業者に対する指導)

Article 50
Director/Manager supervising the visiting workers should give necessary education and training to them for safety and safety control. ...

(第50条 所長は、別に設置される日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所安全協議会(以下、「安全協議会」という。))を通じて外来作業者に安全衛生管理上、必要な情報伝達及び指導を行う。
50.2 管理部長及び外来作業者を監督する課長等は、外来作業者に対し、安全協議会その他により、安全衛生管理上必要な指導を行い、外来作業者が研究所の規定を遵守して、安全かつ円滑に業務を遂行するようにさせなければならない。)

11

Record of Safety Training

- Name of Training
- Subjects
- Date
- Duration
- Name of instructors
- Name of students and their affiliations
- Name and seal of certifier etc.

*This record will be kept for 5 years at the section which gave the training. Usually no personal certificate is given to the students. → For BA workers, a certificate will be given with a signature of the JAEA-OSM.

12

Certificate for BA Workers

(Example)



13

2. Laws/Regulations/Acts

① Laws/Regulations/Acts of Japan

- Industrial Safety and Health Act
- Labor Standards Act
- Ordinance on Industrial Safety and Health
- Ordinance on Prevention of Anoxia, etc.
- Act on Prevention of Radiation Disease Due to Radioisotopes, etc.
- Electricity Business Act
- Ordinance on Technical Standards for Electric Facilities
- High Pressure Gas Safety Act
- Ordinance on Refrigeration Safety
- Safety Ordinance for Cranes
- Fire Service Act
- etc.

14

② Rules and Guidelines of JAEA/NFI

- Radiation Safety Guideline
- Safety and Health Management Rule
- Regulation on Prevention of Hazards for High Pressure Refrigerant Gas Production Facilities
- Electric Facilities Safety Ordinance
- Electric Facilities Safety Regulations
- Regulation on Prevention of Radiation Disease
- Ordinance for Driving and Maintenance of Crane Facilities
- Ordinance for Sling Work
- Safety and Health Management Regulation
- Regulation on Prevention of Hazards due to Dangerous Materials
- JT-60 Facilities Management Guideline
- JT-60 Safety Guidelines
- General information to know regarding JT-60SA Safe Work
- Emergency Response Guideline
- Ordinance for Management Criteria of Electricity Usage for Engineering Work

15

3. Safety in General at NFI

16

Safety and Health (Sanity) Management Regulation for NFI

Chapter I General Provisions

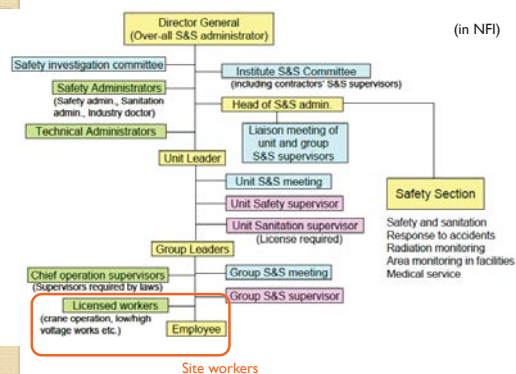
(Objective)

Article I This Regulation defines the management of safety and health in Naka Fusion Institute (NFI), aims at securing safety and maintaining and enhancing mental and physical health for the workers including JAEA, non-JAEA and temporary workers, and at promoting comfortable work environment, in order to comply with Industrial Safety and Health Act (Year 1972 Act No.57), Safety and Health Management Ordinance for Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and Safety and Health Management Regulation for JAEA.

17

Safety and Sanitation (S&S) Administration

(in NFI)



Site workers

18

Guidebooks (English version)

General safety guide (edited by JAEA)

1. Guide for Emergency Measures
2. Guide for Safe Use of Experimental Devices and Dangerous Materials
3. Guide for Radiation Protection in the Controlled Area

Safety guidebooks (edited by NFI)

1. Safety Manual of Electrical Works
2. Inner Rules for the Control of Safety and Sanitation
3. Manual of Protective Actions
4. Inner Rules for the Prevention of Radiation Hazards
5. Rules for Prevention Hazards at the High Pressure Gas Production Facilities
6. Rules for Fire Prevention
7. Regulations Concerning Dangerous Objections
8. JT-60 Operation Guidelines
9. General Safety Text to Perform Experiments in Safety
10. Handbook on Safe Work Practices in Fusion Energy Research and Development

19

General Rule for Safety

1. Before any work begins, the purpose of the activity must be fully understood, all relevant procedures should be reviewed, and all possible risks should be identified and mitigated.
2. When work activities involve other groups, communication between groups should be done in advance.
3. It is important for any workers to maintain good health conditions to be able to work effectively. When feeling ill, please inform your JAEA partner or group supervisor.
4. Work activities beyond one's ability might cause danger, so it should be avoided.
5. Work activities should be performed according to the procedures agreed upon safety planning. When opinions about working procedures differ, the procedure promoting safety most effectively should be adopted.
6. When a work activity involves known danger, the work should be supervised, and the activity must not be done alone.
7. In a group activity, any works should be carried out under the direction of a designated leader.

20

To Carry Items by Hand

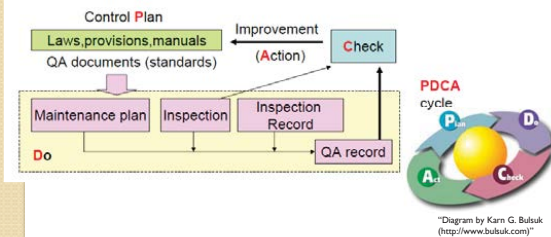
To carry items by hand, do it **in a safe manner**. If necessary, ask someone's help. Do not try to carry heavy items beyond your capability.

1. When handling unfamiliar items or hazardous materials, special attention should be paid.
2. When handling a closed package, be sure what is in the package.
3. When carrying heavy items by hand, it is important to:
 - ① Extend the arms around the item from below keeping the waist low;
 - ② Hold the back straight;
 - ③ Lift slowly with the legs;
 - ④ Maintain good balance by bringing the center of mass of your body as close to the item as possible;
 - ⑤ Maintain a good view of the path ahead;
 - ⑥ Walk slowly and steadily to the place to move.
 - ⑦ Special care should also be taken to put the item on the floor.

21

Safety Strategy

• **QA (Quality Assurance) system** based on **PDCA** concept, as described in ISO9001, has been applied to keep safety at NFI/JAEA.



22

Risk Assessment

- Risk assessment report is prepared in advance of a new work/project.
- Possible hazards by injury, illness or radiation exposure are quantitatively evaluated (from 1 to 30 points).
- The reports are used to reduce possibility of hazards.

(Quantitative evaluation)

Risk Assessment Report

-Date, Name, Work,
-Risk Assessment for each possible injury/illness (1-30)
-Countermeasure for possible danger
-Schedule
-etc.

For injury/illness:

30 points for fatal
20 points for serious
7 points for medium
2 points for slight

For radiation exposure:

30 points for >50 mSv
20 points for 20-50 mSv
10 points for 13-20 mSv
5 points for 1-13 mSv
1 point for <1 mSv

23

Risk Assessment Report

(Example)

リスクアセスメント実施記録

作業名称	実施場所	実施日時	実施者	評価者	評価結果	対策	実施状況	評価結果	対策	実施状況
新装置の設置・点検	実験室	2014年1月18日	田中 一郎	佐藤 太郎	30	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み	30	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み
新装置の設置・点検	実験室	2014年1月18日	田中 一郎	佐藤 太郎	20	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み	20	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み
新装置の設置・点検	実験室	2014年1月18日	田中 一郎	佐藤 太郎	10	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み	10	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み
新装置の設置・点検	実験室	2014年1月18日	田中 一郎	佐藤 太郎	5	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み	5	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み
新装置の設置・点検	実験室	2014年1月18日	田中 一郎	佐藤 太郎	1	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み	1	作業前、作業中、作業後の安全確認を実施する。	実施済み

Estimated Risk (before)

Reduced Risk
(after taking countermeasures)

24

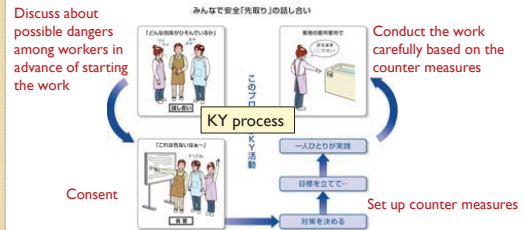
Some Key Words for Safety

- KY** (Kiken-Yochi) is to foresee possible hazards and to make efforts to avoid them.
- TBM** (toolbox meeting) is made before starting works.
- Hiyari-hatto** (near-miss events) small but fearful experiences are reported and shared among the workers to avoid future developed accidents.
- 4S** (Keep: ①Tidy, ②in Order, ③Clean, ④Sanitary)
①Seiri, ②Sei-ton, ③Sei-so, ④Seiketsu

25

KY Activity

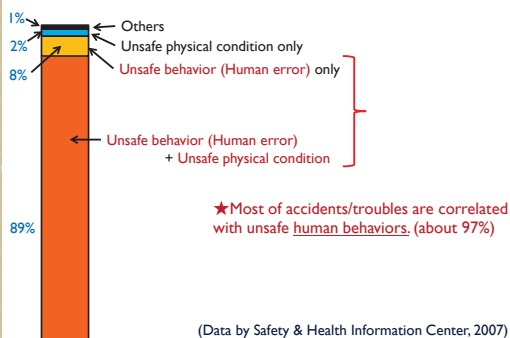
-**KY** (Kiken-Yochi) is to foresee possible hazards and to make efforts to avoid them.



Source: Leaflet on the website of "Ministry of Health, Labour and Welfare"

26

Triggers of Accidents/Troubles



27

Health Condition of Workers

Unhealthy conditions of the workers could lead to human errors, then to accidents. So it is important to check health conditions of the workers, of yourself and your co-workers, as a daily care. This check is required for the leaders/supervisors of the working group in advance of the work and always.

Health Check Items

- headache
- dizziness
- temperature
- stomach ache
- cold
- posture
- movement
- eyes
- conversation

28

Safety Trainings Provided for the Workers at NFI

- Crane and hooking**
 - Safe hooking of heavy stuff
 - Correct posture to lift a relatively-heavy stuff
- Electric works**
 - Low voltage failure, contact of high voltage cables
 - Danger of leak current from a motor
 - Overload by insertion of many cables to an outlet
- Works with rotating machines**
 - Drill, V-belt, roller chain, cleaning machines
- Works at heights**
 - Dropping of a bag of 60 kg to experience its impulsive shock
 - Hanging by a safety belt to learn its suitable hooking position
 - Lifting up an injured person to experience its weight

29

Safety Trainings



30

4. Safety for Special Works

31

Special Works

(Works; of/at/with)

- Welding
- Confined space
- Electric devices
- Laser
- Magnetic field
- Microwave
- Glove box and hood
- Pressure vessel
- Chemical materials
- Rotating Machine
- Crane
- Fork Lift
- Hoisting
- Rigging
- Organic Solvents
- Compressed Gas
(Fuel Gas, High Pressure Gas,
Cryogen, Oxygen/Hydrogen,
Respirators, Canisters and
Poisonous Gas)
- Height
- etc.

Special works are regulated by related laws/regulations and such works require qualified/licensed worker(s).

32

(Example)

Electrical Safety

1. High voltage equipment and motors rated at 7.5 kW or more have to be serviced only by properly trained and certified personnel. (as a NFI rule)
2. The specifications of electrical equipment (e.g., input and output voltage, current, etc.) should be determined and verified before energizing.
3. Visibly damaged equipment should not be used because of the risk of electrical shock or short circuit.
4. Damaged switches, plugs, etc. should be replaced with new ones.
5. All electrical equipment with voltages over 200V should be grounded. Grounding is also recommended to electrical equipment with 100V (Standard voltage of Japan).
6. Flexible electric cords should be neatly and properly placed, without being hung over nails, or draped over cabinets, etc.

33

(cont.)

7. When connecting an electrical equipment to the line, the voltage and line capacity should be confirmed before the connection is made.
8. Determine the status of a circuit with a proper instrument. Prevent unprotected body contact with energized lines or buswork.
9. Servicing electrical equipment is to be done only when the equipment is de-energized.

(Above are not all to keep safety. Consider possible dangers and try to keep safety for any work accordingly.)

34

(Example)

Forklift Safety

A forklift is to be operated only by qualified and licensed personnel.

35

5. Radiation Safety

The registered radiation workers have to receive an education on the subjects below:

1. Effect of radiation on human body (0.5 h)*
2. Safe handling of radioisotopes and radiation-emitting apparatuses (4 h)
3. Laws, rules and regulations on the prevention of radiation hazards (1 h)
4. Inner rules on the prevention of radiation hazards (0.5 h)

*These times required for each subject are the necessary duration to take in advance for the registered workers who will work in the controlled area for the first time. The time can be reduced for the second-year education, and after.

*The education above is NOT required for temporary visitors to the controlled area, but such visitors should understand basic rules going to, taking a look in, or exiting from a controlled area.

36

Controlled Area -Entrance and Exit-



Visitors may go into a controlled area if accompanied with qualified JAEA staff.

1. Entrance/exit must be done through a specified portal.
2. The appropriate individual dosimeter and protective clothing have to be worn.
3. Only necessary items are allowed to bring in with you.
4. When leaving a Class I controlled area, such as the JT-60 Experiment Facility, a contamination check has to be done for the hands, feet, clothing and brought-in items.

37

6. Emergency Measures

You might find a poster like this in your working area.



Naka Fusion Institute

Emergency Measures (Notice for foreigners)

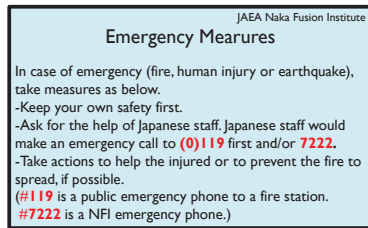
In case of emergency, such as fire, human injury or earthquake, take measures as below.

- Keep your own safety first. Take shelter if needed.
- Japanese staff is to make an emergency phone call.
- Take actions to help the injured or to prevent the fire to spread, if necessary and possible.
- In the case when an earthquake of \geq level 4 happened during the working hours, all the personnel are to be checked. Japanese staff in charge is to make facility check and report the result. Foreign workers are to return to their offices.

(Emergency phone call is made basically by Japanese staff.)
 > **(0)-119** is the number to call a fire engine and/or ambulance.
 > **7222** is an emergency phone number of Naka Fusion Institute, which connects you concurrently to the Safety Section, General Affairs Section, Utilities & Maintenance Section, and the Central Guard

38

Emergency Card



The above "Emergency Card" is prepared for foreign workers. Please keep these in mind when you work at NFI.

39

Measures to Earthquakes

- Keep your own safety first. Avoid any falling objects by hiding at a safe place such as under a desk.
- JAEA staff in charge of facilities will check any possible damage of facilities, even at night or holidays, when an earthquake \geq level 4 happened (nuclear and radiation facility check at level 4, all the facilities at level \geq 5-.)
- During the working time, in addition to the facility check, safety of staff, other workers and visitors are confirmed by the group leaders.

40

Earthquake Levels

(established by Japan Meteorological Agency)

(Level 4)
Most people will get startled.
Hanging objects will sway largely. Unstable objects might fall down.

Level 5 weak:
(>60 Gal)
(1 Gal = 1 cm/s²)

Level 5 strong
Level 5 strong



Source: "Japan Meteorological Agency" website

41

Earthquake Levels Depend on the Place



Epicenter of March 11 Earthquake

Earthquake levels of the East Japan Big Earthquake happened on March 11, 2011.
The magnitude of this earthquake was 9.0.

The earthquake level at NFI is judged by the level at Fukuda area of Naka city, where the Naka City Hall exists (about 4 km south-west of NFI). If the earthquake levels is \geq 4 at this point, NFI will start to take necessary measures for the earthquake.

42

Traffic Safety in NFI

1. Speed limit in NFI site is **30 km/h** for cars/motorcycles.
2. Park your cars/motorcycles at a designated parking lot, not on the road.
3. The automobiles of JAEA staff and the workers who come into NFI site regularly have to be registered and obtain a **permission mark**.
4. In case of car accident, pull over the car and contact **7222** (with a help of nearby Japanese staff, basically). If the accident is involved with human injury, an ambulance should be summoned by calling **(0-)119** immediately.



43

Conclusion

- “Safety First” (*Anzen-dai-ichi*) is our primary concern for any project at any Institute of JAEA.
- Proper **safety education/trainings** have to be provided to all personnel working at JAEA/NFI.
- It is critical and mandatory for any workers, JAEA staff and any visiting workers, to understand general and JAEA/NFI **safety rules and regulations** fully and to follow them.
- Success of any work is achieved on **Safety!**

44




**Thank you
for your attention!**



45


付 録 2 欧州作業員のための保安教育訓練（第2部）資料



Education for safety works

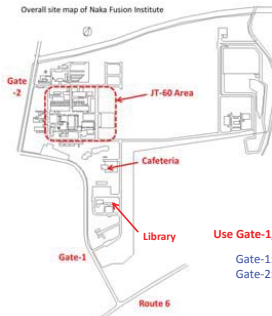
for the on-site activities under the procurement arrangement for the supply of the Quench Protection Circuits for Poloidal and Toroidal Field Coils for the JT-60SA program

28 November 2014
M. Matsukawa
JAEA On-Site Work Manager



Permitted area for your access

Overall site map of Naka Fusion Institute



You can access only permitted area.

1. Room 415/416B of JT-60 control build.
2. JAEA cafeteria
3. Library in 3rd floor of Management build. (TBC)
4. Designated build/room in JT-60 Area as shown later.

Other buildings or rooms could be accessible with escort of JAEA stuff.
(Please enjoy walking outside, but take care to many constructions.)

Use Gate-1, and check your entrance and quit.

Gate-1: open for 24hr.
Gate-2: for Mon-Fri
open for 7:30-9:30, 17:30-18:00

2


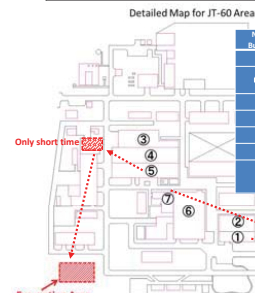


Table 2-1. List of Building for your entrance or access in your work.

JT-60 Rectifier Building and Extended part of JT60 Main Building have a lot of rooms.
Further details will be provided later on.

Detailed Map for JT-60 Area



No. of Building	Name	Your Entrance / Access
①	JT-60 Control Building	OK
②	JT-60 Central Control Room	with JAEA stuff
③	JT-60 Generator Building	with JAEA stuff
④	JT-60 Transformer Yard	with JAEA stuff
⑤	JT60 Rectifier Building	OK (Work Area)
⑥	JT-60 Main Building	with JAEA stuff
⑦	Extended part of JT60 Main Building	OK (Work Area)

Evacuation Area

In case of fire or earthquake, please keep own safety and evacuate to meeting place.


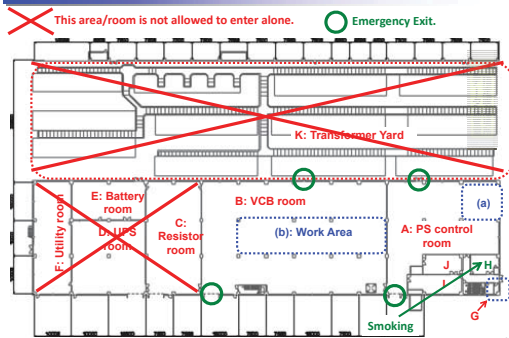


Fig. 2-3. Ground Floor of JT-60 Rectifier Building and Transformer Yard.



This area/room is not allowed to enter alone. Emergency Exit.

K: Transformer Yard

E: Battery room

B: VCB room

C: Resistor room

A: PS control room

F: Utility room

D: UPS room

(a): Work Area

Smoking

4


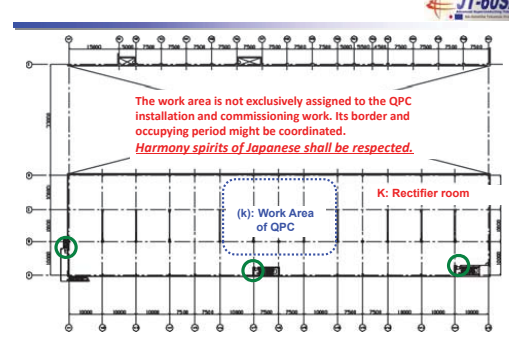


Fig. 2-4. Second Floor of JT-60 Rectifier Building and Transformer Yard.



The work area is not exclusively assigned to the QPC installation and commissioning work. Its border and occupying period might be coordinated.
Harmony spirits of Japanese shall be respected.

(k): Work Area of QPC

K: Rectifier room

5


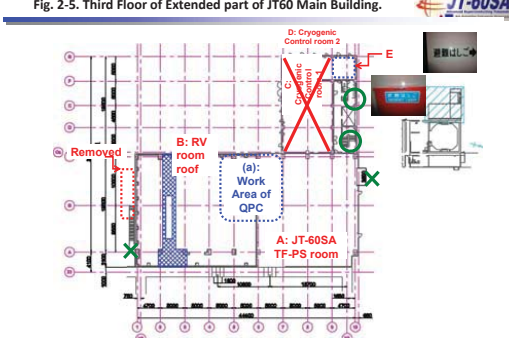


Fig. 2-5. Third Floor of Extended part of JT60 Main Building.



D: Cryogenic Control room 2

B: RV room roof

(a): Work Area of QPC

A: JT-60SA TF-PS room

Removal

6

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan)



1. Broad description of JT-60SA

JT-60SA is the largest superconducting tokamak in the world except ITER. The maximum plasma current is **5.5 MA** with the flattop period of **100 s**, and the total heating power is **41MW** with N-NBI of 10MW, P-NBI of 24MW, ECH of 7MW. Therefore the JT-60SA system is very huge and they consist of many buildings located in around 300m square.

Figure 2-1 shows the overall site map of Naka Fusion Institute (hereafter, Naka-site). There are **two gates** to enter Naka-site, and JT-60 Area is represented by dashed line. The major components of poloidal field coil magnet power supply system are planned to be installed into **JT-60 Generator building** and **JT-60 Rectifier Building** including Transformer Yard, while toroidal field coil power supply in the **extended area of the JT-60 Main Building**.

In case of fire, big earthquake, or other severe accident, go to either nearest **evacuation area** to keep own safety and follow the direction of JAEA OSM. *In normal, emergency announcement is expected, but it is not guaranteed everywhere, so that follow your self-decision.*

The QPC installation and commissioning works are expected **only in the JT-60 Rectifier Building and Extended part of the JT-60 Main Building** (See Fig.2-2). The buildings related to the magnet power supply system is summarized in Table 2-1.

7

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan) cont.



2. State of the plants (magnet power supply)

Since JT-60SA is still under construction, **almost all of magnet power supply is not in operation**. In other words, all of the main devices such as big Motor-Generators, step-down transformers, AC/DC converters, High voltage generation circuit for plasma initiation (SNU), and Quench Protection Circuit (QPC) are not completed for installation. They are under manufacturing at the factory, modification, or maintenance. Then, **only a limited part of the auxiliary power supply is under operation** at May 2014. All visitors, suppliers have to contact with On-site Manager of JT-60SA magnet power supply, M. Matsukawa, in prior to start own activity in the Naka-site for safety. **Special attention is required for other activities which is ongoing under same place.**

8

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan) cont.



2.1 Components/sub-system of JT-60SA magnet power supply

The possible states of operation of the components/sub-system are:

In operation

One of the components are **powered** and under operation, e.g. motor-generator is driven and excited or power receiving with 11kV/18kV through the **central power sub-station** of the Naka-site. In this state, only operator or permitted person can enter into these buildings. Basically, all electrically charged parts can't be easily attached, because they are enclosed by metallic cubicle or isolated with key locked fence.

In safety mode

The plants are **ready to operate**, but **not in operation**. In other words, the main power circuit is not charged or disconnected from the upper power source by the circuit dis-connector/breaker.

Switched off

This is a condition of further safety in the work area. The **main power circuit is grounded** or **VCB is pulled out position** by two stages at least. The circuit might be grounded for the electric works of main circuit.

9

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan) cont.



2.2 Technological service plants

Electric power supplies;

It is still construction and modification phase. Then **temporary electric power supply** (small transformer to match the auxiliary power supply of EU specification) will be prepared by JAEA for the QPC installation and commissioning work. It is expected that the commissioning of QPC unit should be done one by one. Connecting to the conventional electric panel will be managed by JAEA.

Ventilation;

Operation of the ventilation is carried out according to the weekly plan or each demand. **Since the operation of ventilation is not planned at this phase, make a contact with OSM if it is necessary.**

Compressed air;

Air compressor will be installed **temporal air compressor** will be prepared by JAEA in late 2015. Then, a. Its connection and operation will be done by JAEA.

10

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan) cont.



3.1 Access for QPC installations and commissioning

JT-60 Generator Building;

The access to this building is **not allowed**.

JT-60 Transformer Yard and JT60 Rectifier Building;

The access to **JT-60 Transformer Yard** is **not allowed**.

The access to JT-60 Rectifier Building is allowed to following rooms;

PS control room

VCB room

Rectifier room

Extended part of JT60 Main Building;

The access to **extended part of JT60 Main Building** is allowed to following rooms;

JT-60SA TF-PS room

RV room roof

11

Safety prescriptions in this work environment (from General Safety Plan) cont.



4. Description of identified hazards

JT-60SA's risks, especially in the construction phase are associated with the **power commissioning** because the charged area is quite large in comparison to other power facilities. It means that the most likely and severe accident is getting an **electric shock**. Then, **checking by electroscope** in prior to real work is strongly recommended. In addition, conventional accident such as falling from higher place, or hitting something caused electric short circuited can be expected. Anyway, all works should be done according to the well analyzed and planned operation manual provided by the suppliers.

In many of JT-60 building and rooms, there are **two evacuation routes** for emergency. They must be confirmed for all workers at first. In the case of only one evacuation route is available, **alternative route** such as evacuation to building roof should be confirmed. At the same time, the place of the fire extinguisher must be also confirmed.

12

At the Work Area except control room



- The style of dress (costume) when you enter work area of QPC.
 - Work dress** (cloths) is preferable.
 - Work helmet** is necessary.
 - Safety shoes** is preferable.
- Communication tools
 - Telephone for F4E/RFX
Please use 7421 on desk. from overseas, +81-29-270-7421.
 - Wired auto-paging.
Call 7222 only for emergency, but English operator is not guaranteed.
 - Wireless auto-paging. Following terminals would be rentable.
For F4E: 431
For RFX: 432
For Nidex ASI: 433
For NAT: 434
- Primary rules for your safety.
 - Do not enter elsewhere excepted your work area or permitted area.**
 - Do not enter to limited area displayed by bar/rope/warning light.**
 - Do not touch / close to unknown devices.**

13

Example of limited area/warning by bars



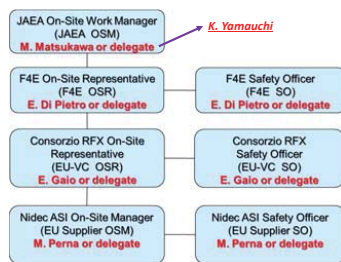
High voltage test facility

Construction



14

Fig.1-1 Organization of EU on-site work



Important thing is to discuss with JAEA OSM or delegate (K. Yamauchi) as early as possible if you have something concerns/doubts on site work or life.

15

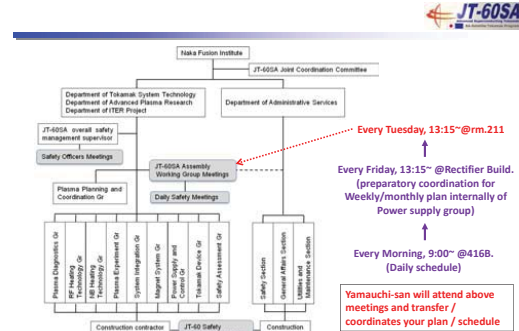


Fig.1-2 JAEA organization of JT-60SA assembly work

16

Table 1-1 General risk factors and possible safety measures



Work item classification	Risk factors	Type of accident event	Possible applicability to QPC on-site activities
1. Concurrent work of multiple companies in the same work area	Insufficient communication	Various disaster	Yes
2. Work in narrow space	Protruding objects in narrow space	Crash Engulfment	NO
3. High-place work	Workers are likely to be off-balance	Crash Fall Falling object	NO
4. Simultaneous works at directly above and below places	Objects or workers may fall on the lower work place	Crash Fall	NO
5. Disassembly and assembly work of scaffolding	Disassembly and assembly works of scaffolding, especially repeated ones	Crash Fall Falling object Collapse	NO
6. Heavy-goods handling work	Installation or transfer of many heavy objects in the narrow place	Crash Fall Falling object	YES
7. Crane operation	Outdoor crane operation, which may be affected by the weather condition	Crash Fall Falling object	Yes (sub-contractor)

17

Table 1-1 General risk factors and possible safety measures (cont.)



Work item classification	Risk factors	Type of accident event	Possible applicability to QPC on-site activities
8. Cut process work	Rotating equipment such as grinder in narrow space	Crash Falling object Engulfment Explosion Fire	YES (for piping)
9. Electrical work	Work by using temporary power supply	Electric shock	YES
10. Work using products causing fire or smoke	Insufficient fire protection measures for the grinder and welding works	Fire	NO
11. Work causing oxygen deficiency	Work in a closed space	Various disaster	NO
12. Work using hazardous substance	Cleaning by alcohol or acetone	Crash Engulfment	NO (?)
13. Industrial waste disposal	Removal and the disassembly of the equipment, which include environmentally regulated substance	Crash Fall Falling object	YES

18

Table 1-2 Typical items of the procedure documents in Naka Fusion Institute

No	Item	Outline	Possible applicability to QPC on-site activities
1	Overall Plan (Installation and commissioning procedure of QPC), Monthly Plan and other documents presented in Sub-grantment	These are the most important document for on-site work of QPC, where outline of all activities to be done in Naka-site are described.	YES 定期計画・月次計画・月間工程表
2	Notification of appointment of election of On-site Representative and Chief Engineer	This is necessary when the notification of the On-site Representative and the Chief Engineer is required in the clauses of a contract.	NO (defined at sub-grantment) 協議代理人選
3	Notification on employee registration	This is necessary when you engage in work more than 30 days continuously in premises with contractors, etc.	YES 従業員登録簿
4	Application for permission of site entrance	This is necessary when workers enter the site for registered period.	YES 施入入場
5	Application for permission of Vehicles for on-site driving	This is necessary when workers regularly use vehicles to enter the Naka site.	YES 車内乗用運転
5	Application for permission of set of temporary buildings and storage yard	This is necessary when you install the temporary office, toilet, warehouse, etc. at Naka site.	NO (Work area is assigned) 工事用仮設建物・材料置場等設置
7	Application for permission of using electric facilities	This is necessary when you install the temporary electric power supply for construction and when you utilize the power from the board of the distribution panel in JAEA.	YES (TBC) 工事用電気工作物工事
8	Request of designated registration for radiation workers	This is necessary when the radiation worker works with using dosimeter.	NO 指定登録記録簿

19

Table 1-2 Typical items of the procedure documents in Naka Fusion Institute (cont.)

No	Item	Outline	Possible applicability to QPC on-site activities
9	Request of change of designated registration for radiation workers	This is necessary when the radiation worker changes the work place, management division, personal identification information.	NO 変更登録記録簿
10	Table of organization for Safety & Health Management, and Emergency communication system	This is necessary when workers start to work. Sub-contractor shall be also involved.	YES 安全衛生体制計画 緊急時連絡体制計画
11	Record of security education and training	Relevant JAEA group will carry out security education and training to the contractor before starting work. Certification would be provided for each.	YES 保安教育習得記録簿
12	Application for permission of road usage and overtime parking	This is necessary when you occupy the road for a long time.	YES (sub-contractor) 道路使用許可・時間外駐車
13	Application for permission of usage of postern gate	This is necessary when you use large vehicles to routinely pass the postern gate.	NO (TBC) 通門内使用許可
14	Notification on after-hours work	This is necessary when you work in the site during off-hours or holiday.	YES (if necessary) 夜間・休日作業
15	Notification of carrying out of worker's goods	This is necessary when you bring up the registered worker's goods.	YES (if necessary) 搬出許可申請書
16	Notification of carrying out of JAEA's goods	This is necessary when you bring up the registered JAEA's goods.	NO (TBC) 物出出庫
17	Application for permission of fire use	This is necessary when you use the welding machines and other fire tools.	YES/NO (TBC) 火源使用許可書

20

Table 1-2 Typical items of the procedure documents in Naka Fusion Institute (cont.)

No	Item	Outline	Possible applicability to QPC on-site activities
18	Application for permission of Crane use, implementation plan of Slings work	This is necessary when you use the JAEA's crane.	NO クレーン使用書・玉掛け作業実施計画
19	Application for permission of interruption of Electricity, water, etc.	This is necessary when you interrupt the electricity, water, etc. of the site.	NO 電気・水等停止依頼書
20	Notification of interruption of fire alarm	This is necessary when you interrupt the fire alarm of the site.	YES/NO (TBC) 火災警報停止許可連絡書
21	Notification of holiday work	This is necessary when you work on holidays Saturday, days, etc.	YES (TBC) 土・日等休日に出かける許可連絡書
22	Application for permission of passage on JT-60 underground duct	This is necessary when you pass with heavy vehicles on JT-60 underground duct.	NO JT-60地下ダクト上通行許可書
23	Sign for temporary placement	This is necessary when you temporarily keep materials, tools, goods, etc.	YES 物品置留表示
24	Sign of work area	This is necessary when you start on-site work.	YES 作業表示
25	Memorandum of agreement of harmful and dangerous work notification	This is necessary when you carry out the harmful and dangerous work.	YES/NO (TBC) 有害・危険業務実施同意書

See another Excel file which involves the English templates for the JAEA internal procedures.

21

Summary (keep in mind)

1. Self control of own health is primary matter of all to work.
Take care your colleague's health similarly with yourself.
(Please check face, voice, ,,,, Communicate well)
2. Excessive extra work shall be avoided.
Keeping a project schedule is important for us. However the safety is the top priority not to be comparable to others.
3. Unscheduled work or changing schedule is prohibited in principle. It requires agreement of F4E-OSR and EU-VC OSR.
4. In case of fire or injury, contact with nearest JAEA stuff to get supports. Otherwise, use PHS to get JAEA OSM (410) in anytime .

22

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /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 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (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

組立量	SI 組立単位			
	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
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 ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		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 ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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コ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。

(c)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)ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f)放射性核種の放射能 (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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
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 ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
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	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ²
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 ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	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 ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π /180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π /10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π /648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 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に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

