



東北地方太平洋沖地震に対する HTTR非常用発電機の健全性確認

Integrity Check of Emergency Generator for the HTTR
after the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake

本間 史隆 猪井 宏幸 渡辺 周二 福谷 幸司

Fumitaka HONMA, Hiroyuki INOI, Syuji WATANABE and Kouji FUKUTANI

大洗研究開発センター

高温工学試験研究炉部

Department of HTTR

Oarai Research and Development Center

December 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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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

東北地方太平洋沖地震に対するH T T R非常用発電機の健全性確認

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター高温工学試験研究炉部

本間史隆、猪井宏幸、渡辺周二、福谷幸司*

(2013 年 9 月 4 日受理)

高温工学試験研究炉の非常用発電機は、ガスタービンエンジンを採用している。軽水炉の非常用発電機はディーゼルエンジンを採用しており、原子炉の非常用発電機にガスタービンエンジンを使用することは、非常に希であり、H T T Rの特徴の一つでもある。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震においては、地震発生直後に発生した商用電源喪失事象により、震度 5 強の強く長時間の揺れの中で非常用発電機が起動した。更に起動直後においても複数回の強い余震に見舞われた。

非常用発電機は、商用電源喪失事象の発生から商用電源が復旧するまでの全期間において、必要な機器に電源を安定供給することができていることを緊急的な調査にて確認しており、非常用発電機に要求されている性能は確実に担保していた。

定期点検の機会を捉え、非常用発電機設備に係る被災状況の把握に重点を置いた点検の一環として、ガスタービンエンジンの燃焼状態を確認したところ、燃焼器ライナーに減肉を確認した。確認した減肉の様子は、運転時間の蓄積後に確認される減肉とは明らかな差異を有していたことから、減肉に係る原因調査を実施すると共に、燃焼器ライナーの仕様を変更することで、減肉に対する耐力を向上させた。

Integrity Check of Emergency Generator for the HTTR after the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake

Fumitaka HONMA, Hiroyuki INOI, Syuji WATANABE and Kouji FUKUTANI*

Department of HTTR
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 4, 2013)

Emergency generators of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) are gas turbine type. On the other hand, emergency generators of the light water reactors are diesel engine type. It is very unusual to adopt the gas turbine engine generator for nuclear power facility, and it is one of the characteristics of the HTTR.

Emergency generator of the HTTR started in the blackout occurred just after the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake on March 11, 2011 with an intensity of 5 upper on the Japanese seven - stage seismic scale and its duration time was long. In addition, we suffered from multiple severe aftershocks just after the start of emergency generators. Emergency generator of the HTTR was able to supply output electric power sufficiently and stably to required loads.

We carried on integrity check of the emergency generator for the HTTR after the earthquake. In particular, we put emphasis on finding faults caused by the earthquake shaking. As a result, we found that the erosion in a combustion liner, and the condition of erosion was very strange and rare. Therefore, we carried out investigations of causes of erosion, and change of specifications for combustion liner to prevent erosion.

Keywords: HTTR , Earthquake , Emergency Generator , Gas Turbine Engine

*Kawasaki Heavy Industries , Ltd .

目 次

1. はじめに	1
2. H T T R の概要	2
3. H T T R の非常用発電機設備	5
3.1 電源系統	5
3.2 ガスタービンエンジンの採用	5
3.3 非常用発電機設備の構成	6
3.4 非常用発電機の起動	7
4. 東日本大震災発生時における非常用発電機の運転	13
4.1 H T T R の状況	13
4.2 非常用発電機の運転実績	13
4.2.1 運転継続時間の算出	14
4.2.2 予備機の確保及び燃料消費の節減対策	14
5. 東日本大震災の影響調査	16
5.1 調査の概要	16
5.2 機器及び基礎部の健全性確認	16
5.3 商用電源喪失時における非常用発電機の作動状況確認	16
5.3.1 非常用発電機の自動起動及び自動負荷投入	16
5.3.2 運転諸元等の確認	16
5.4 要求機能の適合性確認	17
5.5 ガスタービンエンジン、発電機及び燃料系統の詳細調査	17
5.5.1 定期点検における重点確認項目	17
5.5.2 ガスタービンエンジンに係る確認結果	18
5.5.3 発電機に係る確認結果	20
5.5.4 燃料移送ポンプに係る確認結果	20
5.5.5 燃料小出槽に係る確認結果	21
5.5.6 始動用空気圧縮機に係る確認結果	21
5.6 調査結果のまとめ	21
6. 燃焼器ライナーの減肉	33
6.1 燃焼器ライナーの構造	33
6.1.1 燃焼器ライナー内における燃焼	33
6.1.2 燃焼器ライナーの冷却	33
6.1.3 H T T R の燃焼器ライナー	34
6.2 燃焼器ライナーの点検	34
6.2.1 減肉の確認	34
6.2.2 燃料フィルターの目詰まり等確認	35
6.3 減肉の影響	36
6.3.1 減肉の進行	36
6.3.2 減肉片及び固形物がタービンに与える影響	36

6.3.3 燃焼器ライナー交換に係る緊急性評価	3 6
6.4 減肉に係る原因調査	3 7
6.4.1 調査項目	3 7
6.4.2 調査結果	3 8
6.5 減肉の原因特定	3 9
6.6 減肉の対策	4 0
6.6.1 対策の実現性	4 1
6.6.2 対策の決定	4 1
7. 結言	5 6
謝辞	5 6
参考文献	5 7

Contents

1. Introduction	1
2. Summary of the HTTR	2
3. Emergency generator of the HTTR	5
3.1 Power supply system of the HTTR	5
3.2 Adoption of the gas turbine engine for emergency generator	5
3.3 Configuration of emergency generator system	6
3.4 Start of emergency generator	7
4. Operating the emergency generator at the earthquake	1 3
4.1 Situation of the HTTR at the earthquake	1 3
4.2 Operation history of the emergency at the earthquake	1 3
4.2.1 Estimation of the operating duration	1 4
4.2.2 Securing of spare generator and measures for saving fuel	1 4
5. Survey the damage for emergency generator due to the earthquake	1 6
5.1 Survey outline	1 6
5.2 Integrity check for components and basement	1 6
5.3 Operating situation for emergency generator at the blackout	1 6
5.3.1 Start and automatic load input of emergency generators	1 6
5.3.2 Check of the operation data	1 6
5.4 Check of the required performance	1 7
5.5 Detailed investigations for gas turbine engine , fuel supply system and generator	1 7
5.5.1 Major check items in the periodic inspection	1 7
5.5.2 Results of inspection for gas turbine engine	1 8
5.5.3 Results of inspection for generator	2 0
5.5.4 Results of inspection results for fuel pump	2 0
5.5.5 Results of inspection for sub fuel tank	2 1
5.5.6 Results of inspection for air compressor to compress stating air	2 1
5.6 Summary of the findings	2 1
6. Erosion of combustion liner	3 3
6.1 Structure of combustion liner	3 3
6.1.1 Combustion in combustion liner	3 3
6.1.2 Cooling system in combustion liner	3 3
6.1.3 Characteristic of the combustion liner for HTTR	3 4
6.2 Check of combustion liner	3 4
6.2.1 Erosion in combustion liner	3 4
6.2.2 Clogging of fuel filter.	3 5
6.3 Influence of erosion	3 6
6.3.1 Estimate the progress of erosion	3 6

6.3.2	Influence of fragments caused by erosion and solid materials for gas turbine engine	3 6
6.3.3	Replacement the combustion liner from necessity	3 6
6.4	Investigation of the causes	3 7
6.4.1	Item of investigation	3 7
6.4.2	Results of investigation	3 8
6.5	Specification of the erosion-cause	3 9
6.6	Countermeasures	4 0
6.6.1	Feasibility of countermeasures	4 1
6.6.2	Decision of countermeasures	4 1
7.	Conclusion	5 6
	Acknowledgements	5 6
	References	5 7

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センターに設置されている高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）は、黒鉛減速ヘリウム冷却型の高温ガス炉であり^{(1), (2)}、平成10年11月10日に初臨界に達した後、平成13年12月7日に定格熱出力30MW及び原子炉出口冷却材温度850℃を達成^{(3), (4)}、平成16年4月19日には原子炉出力30MW及び原子炉出口冷却材温度950℃を達成^{(5), (6), (7)}した。更に、平成22年3月13日に原子炉出口冷却材温度950℃での連続50日運転を達成⁽⁸⁾した。

高温工学試験研究炉（以下、HTTRという。）の非常用発電機は、単一故障の考慮から2台設置することで多重化が図られており、商用電源喪失事象の発生時には、非常用発電機が自動起動することにより規定時間内にて非常用低圧母線に電力を供給する。非常用低圧母線の負荷には、崩壊熱除去を行う補助冷却設備等の工学的安全施設、監視員等の居住環境を確保する換気空調設備の給排気系統、事故後監視計装及び放射線管理設備等があり、2台の非常用発電機に負荷分散することで多重化が図られている。

非常用発電機はガスタービンエンジン方式を採用しており、原子力発電所の非常用発電機の全てがディーゼルエンジン方式を採用していることを踏まえれば、原子炉の非常用発電機にガスタービンエンジンを採用することは非常に希であり、高温ガス炉であるHTTRの特徴の一つでもある。これまでの主な保守活動としては、定期的に実施する点検に加え、ガスタービンエンジンの分解点検⁽⁹⁾並びに発電機の絶縁抵抗回復作業等を実施している。

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東日本大震災という。）直後に発生した商用電源喪失事象においては、震度5強の強く長時間の揺れの中で非常用発電機が起動した。更に、起動直後においても複数回の強い余震に見舞われると共に、ガスタービンエンジンの連続長時間運転を経験した。なお、HTTRの非常用発電機は、東日本大震災の発生から商用電源が復旧するまでの全期間において、運転が必要な非常用機器に電源を安定供給することができしており、設置許可申請書に記載されている要求性能は確実に担保していた。

平成23年6月、東日本大震災の影響確認に重点を置いた点検を実施したところ、燃料噴射孔における煤状物質の堆積、燃焼器ライナーの減肉並びに燃料フィルターのスラッジによる重度の目詰まりを確認した。確認した減肉の様子は、運転時間の蓄積後に確認される減肉とは明らかな差異を有していたことから、減肉に係る原因調査を実施すると共に、燃焼器ライナーの仕様を変更することで、減肉に対する耐力を向上させ、更なる大地震に対する非常用発電機の信頼性向上を図った。

本報告書は、東日本大震災に被災した非常用発電機設備の影響調査の内容及びその結果に加え、燃焼器ライナーの減肉に係る原因調査及び燃焼器ライナーの仕様変更の内容について取り纏めたものである。

2. H T T R の概要

H T T R は、燃料に被覆粒子燃料、減速材に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを使用する定格出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850℃又は 950℃の高温ガス炉である。H T T R の基本仕様を表 2.1 に示す。

H T T R の原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備（1 次冷却設備・2 次ヘリウム冷却設備・加圧水冷却設備）、原子炉停止後に原子炉の崩壊熱及びその他の残留熱を除去する補助冷却設備、原子炉圧力容器の周囲に設置した水冷管パネルにより 1 次遮へい体を冷却する炉容器冷却設備の 3 系統の冷却設備で構成されている。なお、炉容器冷却設備は、補助冷却設備による冷却が期待できない事故時においても、原子炉の残留熱を除去することが可能である。H T T R の冷却設備系統を図 2.1 に示す。

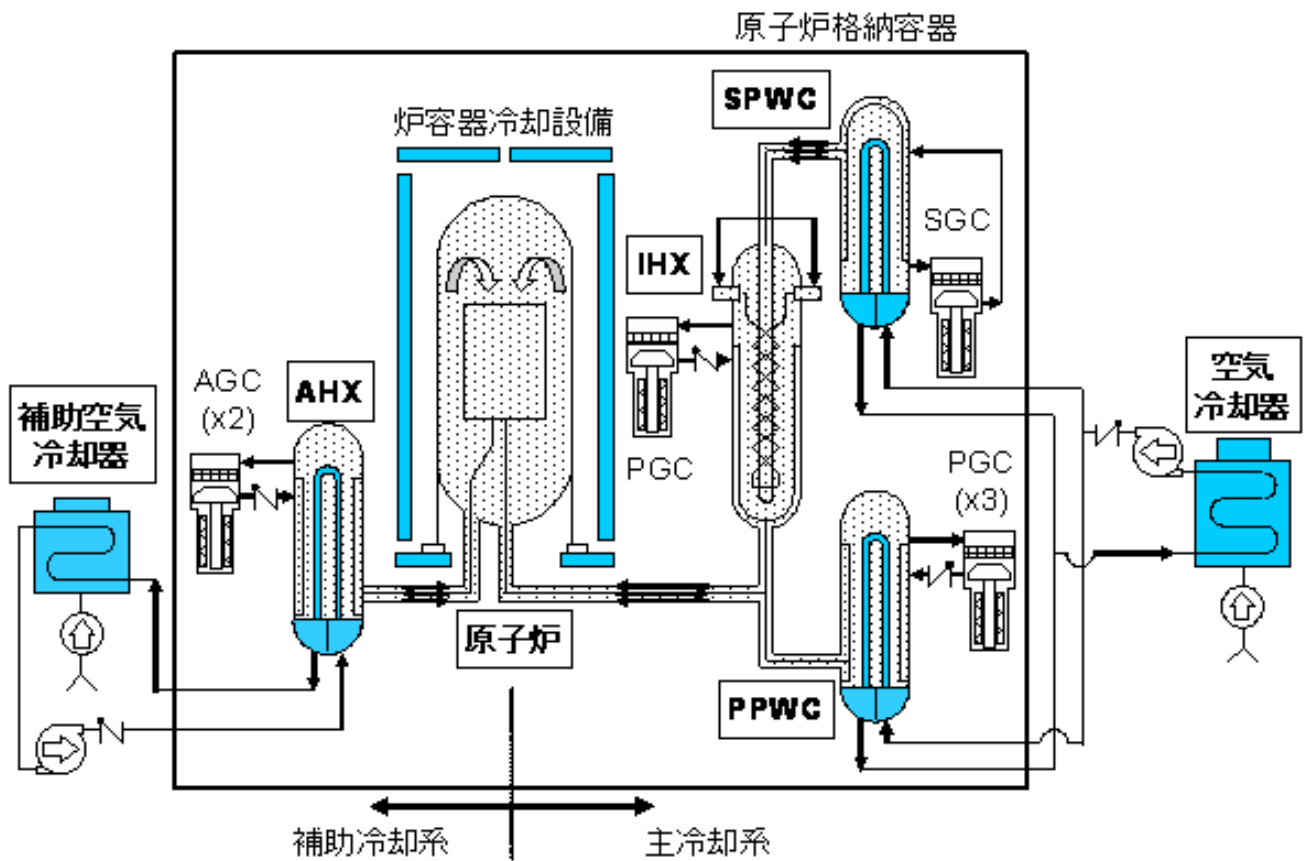
主冷却設備には、中間熱交換器（IHX：Intermediate Heat Exchanger）及び 1 次加圧水冷却器（PPWC：Primary Pressurized Water Cooler）の 2 つの熱交換器を設置しており、中間熱交換器の 2 次側に 2 次加圧水冷却器（SPWC：Secondary Pressurized Water Cooler）がある。通常運転時に原子炉内から発生した熱の大部分は、これらの熱交換器を経由後、加圧水冷却設備である加圧水空気冷却器（ACL：Air-Cooler）より大気へ放散される。補助冷却設備は、主冷却設備と並列に構成されており、熱交換器として補助冷却器（AHX：Auxiliary Heat Exchanger）がある。原子炉スクラム時の崩壊熱等の残留熱は、補助冷却器を経由後、補助冷却水空気冷却器より大気に放散される。炉容器冷却設備には、原子炉圧力容器の外周から間接的に炉心を冷却するために水冷管パネルが設けられており、1 次遮へい体のコンクリート等を冷却し、昇温した水の熱は、熱交換器である冷却器を経由した後、補機冷却水設備の冷却塔より大気へ放散される。

H T T R は、運転モード選択装置により、原子炉出口冷却材温度を 950℃とする高温試験運転モード、同 850℃とする定格運転モードを選択することが可能であり、更に 1 次加圧水冷却器のみで除熱を行う単独運転モード、1 次加圧水冷却器と中間熱交換器の両方で除熱を行う並列運転モードを選択できる。

これらの運転モードに加え、炉心熱容量が大きく、負のフィードバック特性に優れている H T T R の安全性を定量的に実証することを目的とした試験運転モードとして、1 次系流量低下試験、制御棒引抜き試験の特殊運転モードを有する。更に、1 次系流量低下試験モードは、循環機停止試験、流量部分喪失試験、循環機 3 台停止試験及び炉容器冷却設備停止試験に分類される。これらの試験を行うことにより、冷却機能を喪失させることによる負のフィードバック特性、燃料温度の挙動、制御系の安定性を確認し、高温ガス炉技術の高度化に資するための知見を蓄積する。

表 2.1 高温工学試験研究炉（HTTR）の基本仕様

原子炉熱出力	30 MW	
炉心有効高さ	2.9 m	
炉心等価直径	2.3 m	
炉心構造材	黒鉛	
出力密度	2.5 MW/m ³ 黒鉛	
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子／黒鉛分散型	
ウラン濃縮度	3～10%（平均6%）	
燃料体形式	ブロック型	
原子炉圧力容器	鋼製（2 ^{1/4} Cr－1Mo鋼）	
炉心冷却材	ヘリウムガス	
主冷却ループ数	1ループ（加圧水冷却器及び中間熱交換器）	
1次冷却材圧力	約4.0 MPaG（定格出力時・ヘリウム冷却）	
2次冷却材圧力	約4.1 MPaG（定格出力時・ヘリウム冷却）	
	約3.5 MPaG（定格出力時・加圧水冷却）	
	（定格運転時）	（高温試験運転時）
原子炉入口冷却材温度	395℃	395℃
原子炉出口冷却材温度	850℃	950℃



IHX : 中間熱交換器
 PPWC : 1次加圧水冷却器
 PGC : 1次ヘリウム循環機
 SPWC : 2次加圧水冷却器
 SG : 2次ヘリウム循環機
 AHX : 補助冷却器
 AGC : 補助ヘリウム循環機

図 2.1 HTTRの冷却設備系統

3. H T T R の非常用発電機設備

3.1 電源系統

H T T R の電源系統は、大洗研究開発センターの構内受電所から 6.6 k V で構内配電線 1 回線により供給され、常用高压 1 母線、常用低压 2 母線及び非常用低压 2 母線から構成される。常用低压 2 母線は常用高压母線から、非常用低压 2 母線は常用高压母線とガスタービンエンジン方式の非常用発電機から受電する方式である。H T T R の電源系統図を図 3.1 に示す。

3.2 ガスタービンエンジンの採用

原子力発電所の非常用発電機をはじめ、国内における軽水炉用の非常用発電機の大部分はディーゼルエンジンを採用する中、H T T R においてはガスタービンエンジンを採用している。従って、原子炉の非常用発電機にガスタービンエンジンを採用することは極めて希であり、高温ガス炉である H T T R の特徴の一つでもある。ガスタービンエンジン発電機とディーゼルエンジン発電機との対比を表 3.1 に示す。ガスタービンエンジン発電機の採用に当たって考慮した事項を以下に挙げる。

1) 冷却水が不要である。

冷却水系統が必要とならないことについては、貯水槽、配管及びポンプ等の設置が必要とならないことから設備が小型化でき、設備故障に係る信頼性の向上に寄与できる。

2) ディーゼル発電機に比べ、単純構造であり部品点数が少ない。

部品点数を少なくできることについては、部品故障のリスク及びびランニングコストの低減の観点から有効である。

3) ディーゼル発電機に比べ、燃料消費率が高い。

燃料消費率が高いことは、頻繁な燃料補給を必要とすることとなるが、非常用発電機であることから、連続的な燃料消費は発生せず、頻繁な燃料補給は必要とならない。

4) 無負荷運転が可能である。

長期間の原子炉運転中においても、ガスタービンエンジンの健全性確認を目的とした試運転が可能となる。

5) 負荷投入率が高い。

定格負荷の瞬時投入が可能となる。

6) 電圧確立時間が長時間となる。

軽水炉においては短時間での電圧確立が必須であり、本特性は、ガスタービンエンジン発電機を採用する上での大きな懸念事項となる。一方、H T T R における採用について、H T T R が固有の安全性が特に高い高温ガス炉であることで許容できる。具体的な事項を以下に示す。

- ・炉心の出力密度が小さく、炉心及び燃料等は黒鉛で構成されていることから熱容量が極めて大きい。このことは、炉心及び原子炉冷却材圧力バウンダリに係る温度及び圧力の挙動が緩慢となり、炉心温度を懸念するまでの時間を長くとれる。
- ・HTTR の燃料は、二酸化ウランの燃料核を低密度熱分解炭素等で四重に被覆した被覆燃料粒子であり、異常な過渡変化時において、1600℃までの最高使用温度が許容されており、燃料の閉じこめ性能が極めて優れている。
- ・商用電源喪失時に要求される電圧確立時間は、商用電源喪失から 50 秒以内としており、10 秒以内を要求されている軽水炉と比較すると大きく許容されている。これについては、HTTR が炉心及び原子炉冷却材圧力バウンダリに係る温度及び圧力の挙動が緩慢であることが大きく起因する。

7) 短時間の繰返し起動は不可能である。

繰返し起動は実施しないことから懸案事項とはならない。

これらの考慮の結果、高負荷投入率、無負荷運転の実現、冷却水の不要化、単純構造、少ない部品点数等について、ディーゼル発電機よりも優位性を有していると判断した。また、ガスタービン発電機の短所についても抽出し、HTTR への影響評価を実施した結果、特段の懸案事項は確認されなかったことから採用を決定した。特に、冷却水を必要としないことについては、起動中における冷却設備の故障を想定する必要がないことに加え、地震の揺れによる冷却水槽・冷却水配管の破損を想定する必要がなくなる。このことは、非常用発電機の信頼性向上に大きく寄与するものである。

3.3 非常用発電機設備の構成

ガスタービンエンジン及び発電機の機器仕様を表 3.2 に示す。

HTTR の非常用発電機は、発電機本体、ガスタービンエンジン、始動用空気槽、始動用空気圧縮機、主燃料槽、燃料小出槽、制御盤等から主に構成される。

ガスタービンエンジンの起動は圧縮空気方式を採用している。具体的には、起動信号により始動用空気槽に貯留されている圧縮空気をガスタービンエンジンに供給することで、エアスタータを駆動し、エンジンを始動する。全負荷時におけるガスタービンエンジンの燃料消費率は 1 時間当たり 700 リットル程度であり、無給油で 6 日間程度、ガスタービンエンジンを運転することが可能である。

始動用空気槽は 1 系統当たり 2 槽設置することで多重化を図っており、完全充気状態から 1 槽あたり連続 3 回のガスタービンエンジンの起動が可能である。始動用空気槽には、常に所定の圧縮空気が充填されるように空気圧縮機を待機状態とする。具体的には、始動用空気槽の圧力が 2.65MPa まで低下すると始動用圧縮機が自動起動し、2.94MPa 到達で自動停止する。始動用空気圧縮機は、始動用空気槽毎に 2 台ずつ設置しており、連続 3 回のガスタービンエンジンの起動後、6 時間以内に始動用空気槽を完全充気する性能を有している。また、手動切替え操作により、何れの圧縮機により充気することも可能である。始動用空気系統に係る系統図を図 3.2 に示す。

ガスタービンエンジンの燃料には、JIS K2205 に基づく 1 種 1 号の A 重油を使用している。使用できる燃料としては、灯油及び軽油の使用も可能ではあるが、経済性の観点及び危険物

施設としての管理上の観点からA重油を使用することとした。従って、使用するA重油に対しては、厳格な品質管理基準が必要となる。JIS で規定されているA重油の性状範囲は広範囲である為、製作・保守メーカーの推奨を参考に、使用するA重油の品質を管理している。具体的には、JIS では規定されていない密度(15℃)、目詰まり点、10%残油残留炭素値について管理値を取り決めている。JIS で規定されている動粘度(50℃)についても、JIS 基準値の1/10程度の管理値を定めて厳しく管理している。

A重油は、100 キロリットル容量の主燃料槽を1槽／系統、1950 リットル容量の燃料小出槽を1槽／系統にて貯蔵しており、燃料移送ポンプにより燃料小出槽に小出して使用する。燃料小出槽には一定量のA重油が常に貯蔵されるよう、燃料移送ポンプを待機状態とし、2台／系統を設置することで多重化を図っている。また、燃料小出槽からガスタービンエンジンまでのA重油の送油については、動力を介さずに圧力差のみで送油することで信頼性を確保している。燃料系統に係る系統図を図3.3に示す。

3.4 非常用発電機の起動

商用電源喪失時においては、非常用低圧母線の各相の線間に設置される不足電圧継電器の動作信号を安全保護設備の2 out of 3回路で検知し、1.5秒間の停電確認を行った後、非常用低圧母線の主幹遮断器を遮断すると共にガスタービンエンジンが自動起動する。自動起動したガスタービンエンジンは、25秒程度で定格の55%、33秒程度で100%回転数に達する。なお、55%回転数に達した後、発電機の初期励磁が開始され、2秒間の電圧確認後、非常用発電機の主幹遮断器を投入する。なお、施設定期検査にて確認している主幹遮断器が投入されるまでの時間については、起動から35秒程度であり、設置許可申請書における要求事項である50秒以内の電圧確立を十分満足する性能を有している。非常用発電機の主幹遮断器を投入後、安全保護系からの負荷投入指令により負荷が投入される。負荷投入については、非常用低圧母線の電圧変動を考慮し、7段階に分けて順次投入することとしている。

第1段階投入は主幹遮断器の投入と同時にわれ、原子炉施設の安全確保に必要な直流電源及び交流無停電電源装置、放射線監視設備、消火設備等に電源を供給する。第2段階投入は主幹遮断器の投入から5秒後、第3段階投入は同15秒後に行われ、原子炉からの崩壊熱を除去する補助冷却設備、補助冷却設備が期待できない状況において原子炉圧力容器を冷却する炉容器冷却設備等に電源を供給する。第4段階投入は主幹遮断器の投入から40秒後に行われ、管理区域内の換気空調設備の給排気系統及び制御弁に空気を供給する圧縮空気設備等に電源を供給する。第5段階投入以降については、緊急的な負荷投入の必要性が低い、長期間の商用電源喪失時において、起動が要求される設備機器に電源を供給する。図3.4に自動負荷投入シーケンスを示す。

表 3.1 ガスタービン発電機とディーゼル発電機との対比

対比項目		ガスタービン発電機	ディーゼル発電機
起 動 特 性	起動方法	圧縮空気	
	起動時間	電圧確立まで 40 秒以内	軽水炉の実績で 10 秒以内
	負荷投入率	100%投入可能（1 軸式）	100%（無過給式）～ 50%（高過給式）
	電圧変動（定常時）	±0.5%程度	±1.5%程度
	周波数変動（定常時）	±0.5%程度	±3%程度
	回転数変動率	100%負荷投入時 ±5%程度	60～70%負荷投入時 ±10%程度
	起動信頼性	ディーゼルと同等	高い
	繰返し起動	短時間での繰返し起動は不可	多くても可
	低温起動	A 重油使用で約－10℃で可能	A 重油使用で約－5℃で可能
	無負荷運転	無負荷長時間運転が可能	無負荷・軽負荷の連続運転が 不可能
構 造	寸法・重量	小型・軽量	大型・重量
	構造	単純構造、部品点数 少	複雑構造、部品点数 多
	設置スペース	小（ディーゼルの 7 割程度）	大
そ の 他	騒音	高周波、低振幅	低周波、大振幅
	振動	高速回転運動-振動小	ピストン往復運動-振動大
	排気ガス	NO _x , SO _x ともに 100ppm 程度	NO _x -500ppm, SO _x -100ppm 以上
	燃料消費量	ディーゼルより大	ガスタービンより小
	冷却水の要否	不要	必要
	使用実績	原子炉では希、ビル等で使用	軽水炉等で使用

表 3.2 ガスタービンエンジン及び発電機の機器仕様

ガスタービン エンジン	形 式		単純開放サイクル 1 軸式
	出 力		3600PS (15℃)、3150PS (40℃)
	回転数		タービン主軸 22000rpm 出 力 軸 1500rpm
	使用燃料		A 重油 (1 種 1 号 JIS-K-2205)
	使用潤滑油		合成基油 (AERO SELL ASTO-500)
	始動方式		圧縮空気式
	冷却方式		空 冷 式
発電機	型 式		T2500-BER (ガスタービン駆動同期型)
	定格出力		2500kVA
	定格電圧		460V
	定格電流		3138A
	定格力率		0.8
	極 数		4 極
	回 転 数		1500rpm
	励磁機	形 式	CFC-D (ブラシレス方式)
		出 力	30kW
		電 圧	170V
		電 流	176A

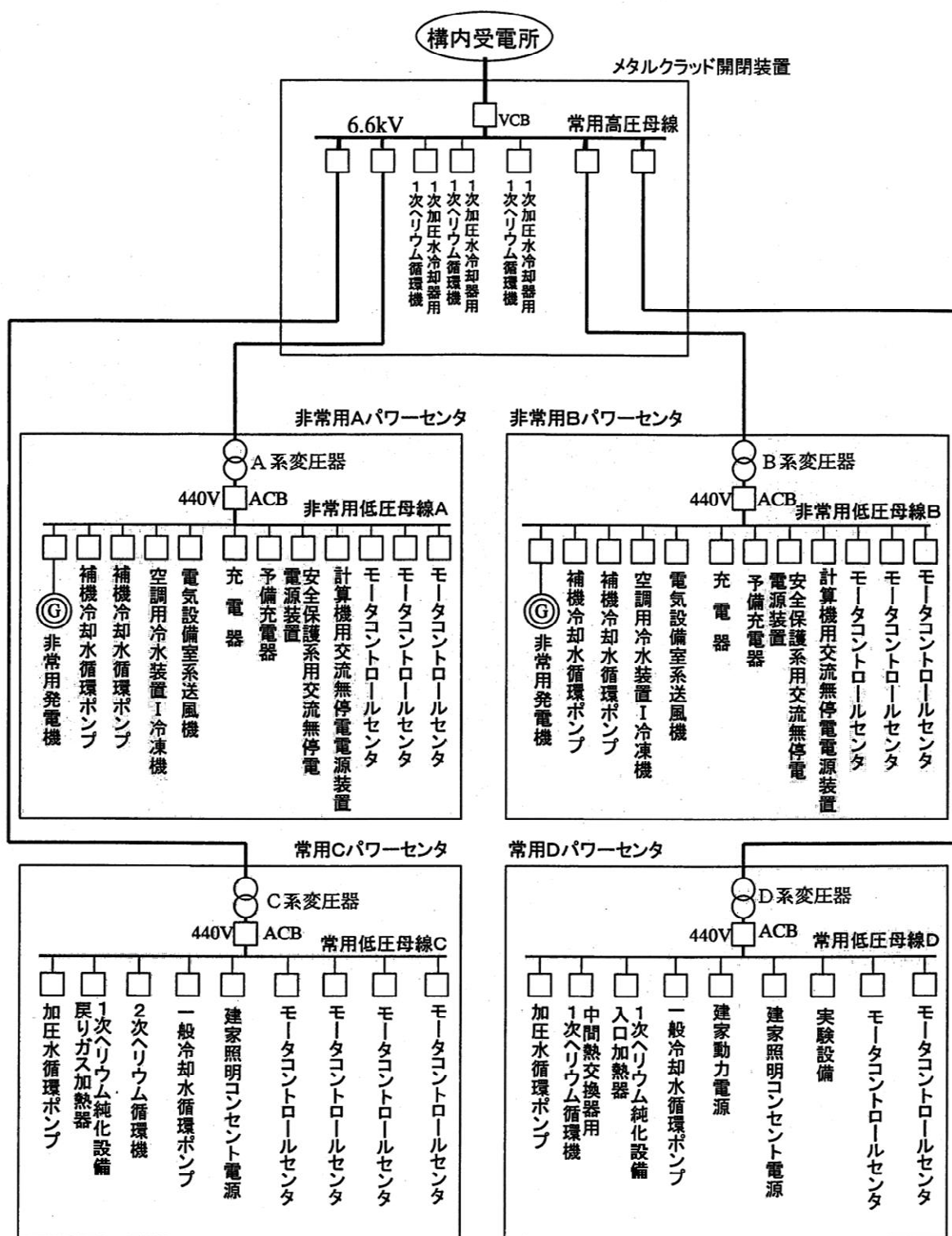


図 3.1 HTTRの電源系統図

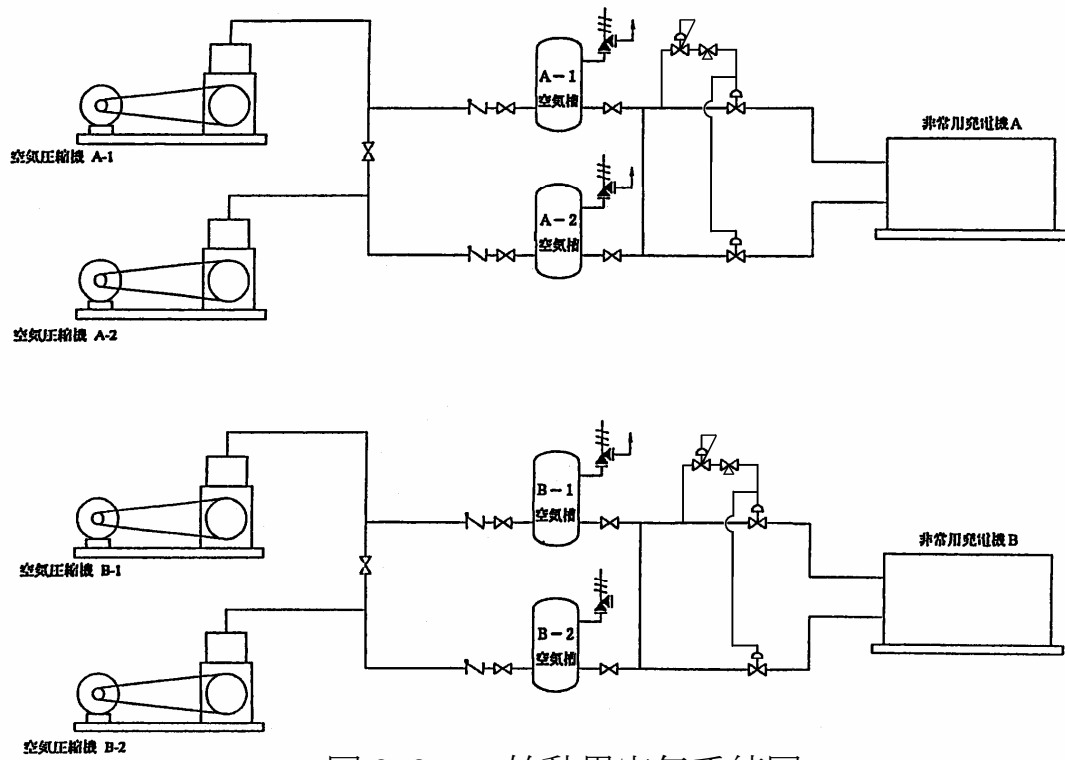


図 3.2 始動用空気系統図

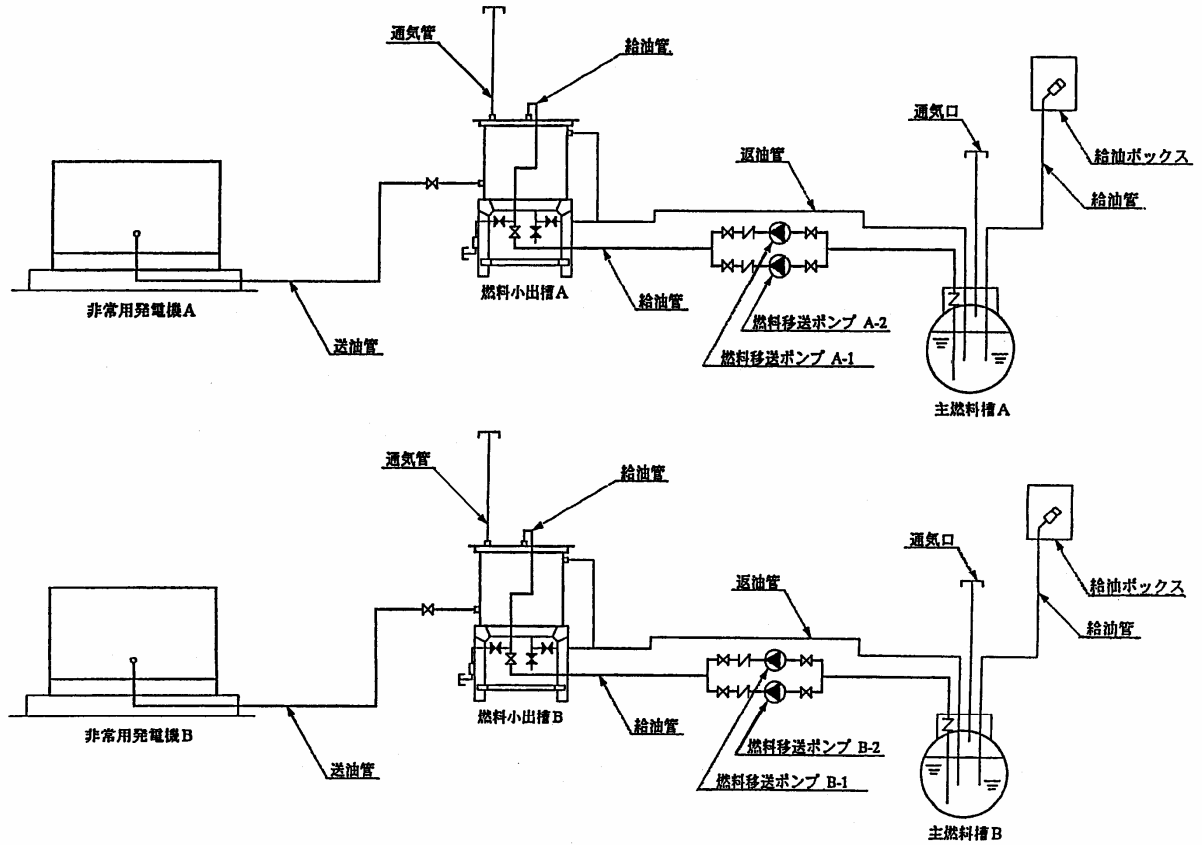


図 3.3 燃料系統図

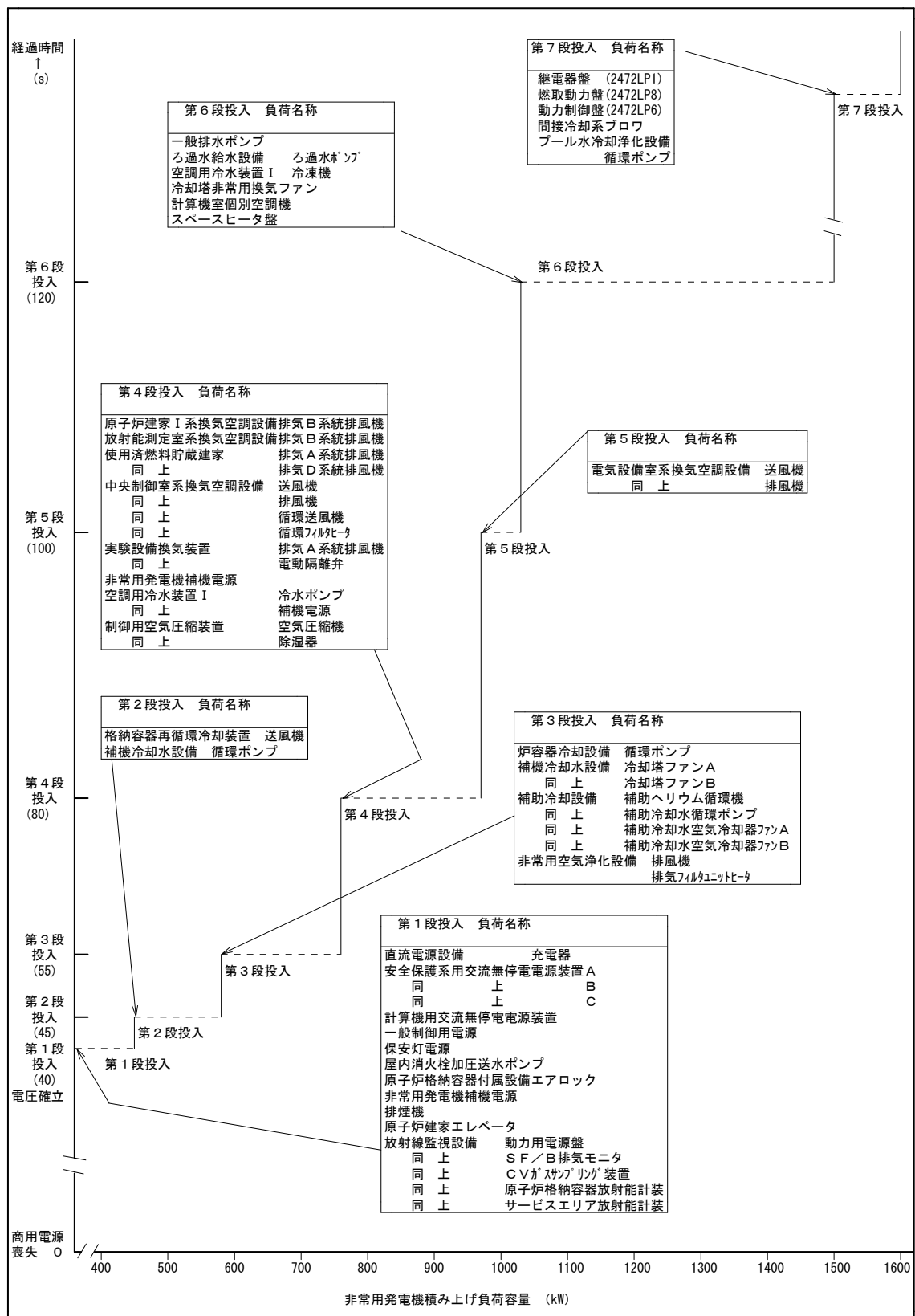


図 3.4 自動負荷投入シーケンス図

4. 東日本大震災発生時における非常用発電機の運転

4.1 H T T R の状況

H T T Rにおいては、平成23年1月17日から平成23年1月24日にかけて実施した第13サイクル運転（原子炉出力約30kWにおける温度係数測定を行う特殊試験及び原子炉出力9MWにおける炉容器冷却設備停止を行う安全性実証試験）を完遂し、同年2月1日から第5回施設定期検査を開始していた。

平成23年3月11日14時46分、宮城県沖を震源とするマグニチュード9.0の東日本大震災が発生し、大洗研究開発センターにおいては震度5強の強い揺れを観測した。東日本大震災の発生時、原子炉は停止しており、崩壊熱の除去運転も必要とならない冷温停止状態であった。なお、H T T Rにおいては、運転開始以降、使用済燃料は発生しておらず、使用済燃料貯蔵プールの冷却は必要ない状態である。

東日本大震災の発生から2分後の14時48分に商用電源喪失事象が発生し、非常用低圧母線の電圧低下を原子炉安全保護設備が検知することにより、非常用発電機が自動起動した。東日本大震災直後の巡視点検にて、ガスタービンエンジン、発電機、始動用空気圧縮機、燃料移送ポンプ及び制御盤の健全性を確認すると共に、安定的な電源供給の継続を確認した。

地震発生から2日が経過した3月13日20時24分より、大洗研究開発センター北地区受電所において商用電源の受電を開始した。H T T Rにおいても、ガスタービンエンジンの燃料残量を確保する観点から、商用電源への早急な切替えを実施する必要があったが、負荷の健全性確認が済んでいなかったことから、優先的に復電させる機器を選定した上、段階的な復電を実施した。なお、優先的に復電させた負荷については、原子炉の停止状態を監視する計装設備、換気空調設備、放射線管理設備に係る機器とし、基礎部を含めた外観点検及び絶縁抵抗測定等の健全性確認が終了した3月14日13時56分より、給電措置を開始した。なお、常用系機器については、外観点検及び絶縁抵抗測定等により、負荷の健全性を逐一確認した上、3月16日より給電操作を開始した。

4.2 非常用発電機の運転実績

東日本大震災発生から、非常用発電機を停止するまでの時系列を表4.1に示す。東日本大震災の発生から2分後に商用電源喪失事象が発生、原子炉安全保護設備による非常用低圧母線の電圧低下の検知により非常用発電機が自動起動した。その後、予め定められている自動負荷投入シーケンスに従い、必要な機器に給電を開始した。

東日本大震災に伴うインフラの混乱により、商用電源の復電時期並びにA重油の補給計画が立案できない状況であったことから、運転継続可能時間の算出、燃料消費量の節減対策等を以下のとおり検討した。

4.2.1 運転継続時間の算出

H T T Rでは、非常用発電機を2台設置することで多重化を図っており、100 キロリットル容量の主燃料槽、1950 リットル容量の燃料小出槽を系統毎に設けている。東日本大震災発生直前におけるA重油の残量は、A号機の主燃料槽油量が90 キロリットル、燃料小出槽油量が1640 リットル、B号機の主燃料槽油量が89 キロリットル、燃料小出槽油量が1620 リットルであることを確認している。また、東日本大震災発生から約80分後における燃料小出槽の残量については、A号機が920 リットル、B号機が1020 リットルであることを確認している。従って、燃料消費率はA号機 540 リットル/時間、B号機は450 リットル/時間であり、A号機は約7日、B号機は約8.3日程度で燃料が枯渇することを予想した。

4.2.2 予備機の確保及び燃料消費の節減対策

東日本大震災の発生直後においては、震度5弱の地震を含め複数回の地震が発生しており、起動中のガスタービンエンジンにも大きな地震の揺れが連続的に作用した。地震後の巡視点検において、東日本大震災発生直後の運転データは常に許容範囲に収まっており、東日本大震災発生前の運転データと差異がないことを確認した。しかしながら、詳細な状態基準保全の実施による健全性確認は困難な状況にあったこと、強い地震の揺れが作用している最中に非常用発電機が起動する等の経験及び知見をこれまでににおいても有していなかったことから、健全性が確認されている段階にてB号機を停止することにより、非常用発電機の予備機を確保する必要があることを判断した。商用電源喪失時において、多重化が要求されている非常用発電機の1台を停止する事については、H T T Rは冷温停止の状態であり、使用済燃料貯蔵プールの冷却も不要な状況であったことを鑑みた結果、許容することとした。なお、これらの運用は、緊急的な措置となることから、A号機に異常が発生した場合の異常時対応手順等を作成することで状況変化への迅速な対応に備えた。

更に、運転を継続するA号機の負荷を限定することで燃料消費量の抑制を図った。具体的には、崩壊熱を除去する設備に係る負荷、原子炉停止中においては設備起動を必要としない機器については起動しないこととし、原子炉の停止状態を監視する計装設備、安全保護系設備、運転員の居住環境を確保する中央制御室系換気空調設備、電気盤を冷却する電気設備室系換気空調設備、放射線監視機器等、原子炉の安全確保上必要な最低限の負荷に限定した。

商用電源喪失による非常用発電機の自動起動から商用電源が復旧するまでの運転時間は、A号機72時間24分、B号機26時間47分であった。予備機としたB号機の停止時におけるA重油残量は約79キロリットルであり、この残量については7.3日間程度のガスタービンエンジンの運転を可能とするものである。

表 4.1 東日本大震災発生から非常用発電機を停止するまでの時系列

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分	東日本大震災発生（大洗町磯浜町震度 5 強）
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 48 分	商用電源喪失 非常用発電機 A 号機自動起動 主燃料槽油量：90 キロリットル 燃料小出槽油量：1640 リットル 非常用発電機 B 号機自動起動 主燃料槽油量：89 キロリットル 燃料小出槽油量：1620 リットル
平成 23 年 3 月 11 日 14 時 51 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 3）発生
平成 23 年 3 月 11 日 15 時 11 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 3）発生
平成 23 年 3 月 11 日 15 時 12 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 3）発生
平成 23 年 3 月 11 日 15 時 15 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 5 弱）発生
平成 23 年 3 月 11 日 16 時 06 分	燃料油量確認 ・非常用発電機 A 号機 主燃料槽油量：90 キロリットル 燃料小出槽油量：920 リットル ・非常用発電機 B 号機 主燃料槽油量：88 キロリットル 燃料小出槽油量：1020 リットル 運転データ確認開始（2 時間毎） ・ガスタービンエンジン 潤滑油温度・圧力 回転数・排気温度 ・発電機 電圧・電流・周波数・電力
平成 23 年 3 月 11 日 16 時 17 分	燃料残量から運転継続可能時間を算出 燃料移送ポンプの健全性確認
平成 23 年 3 月 11 日 17 時 20 分	主燃料槽から燃料小出槽への移送開始 ・585 リットルで移送開始、1850 リットル移送停止 （以降、2～3 時間毎に給油ポンプ作動）
平成 23 年 3 月 12 日 04 時 08 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 4）発生
平成 23 年 3 月 12 日 16 時 25 分	非常用発電機 B 号機停止 主燃料槽油量：76 キロリットル 燃料小出槽油量：680 リットル 運転時間 25 時間 40 分
平成 23 年 3 月 13 日 20 時 30 分	大洗研究開発センター北地区受電所商用電源受電
平成 23 年 3 月 14 日 10 時 02 分頃	地震（大洗町磯浜町震度 4）発生
平成 23 年 3 月 14 日 13 時 20 分	原子炉建家復電開始
平成 23 年 3 月 14 日 14 時 06 分	原子炉建家復電終了 非常用発電機 A 号機停止 主燃料槽油量：42 キロリットル 燃料小出槽油量：1840 リットル 運転時間 71 時間 21 分

5. 東日本大震災の影響調査

5.1 調査の概要

東日本大震災の揺れの中で非常用発電機が起動していること、また、起動直後においても震度 5 弱の地震を含む複数回の余震の揺れが非常用発電機設備に作用していること及び長時間の商用電源喪失に伴う連続運転を実施していることから、地震の揺れに対する影響把握に重点を置き、以下の確認を実施した。

- 機器及び基礎部の健全性確認
- 商用電源喪失時における非常用発電機の作動状況確認
- 要求機能の適合性確認
- ガスタービンエンジン、発電機及び始動用空気系統の詳細調査

5.2 機器及び基礎部の健全性確認

ガスタービンエンジン、発電機、始動用空気圧縮機、始動用空気槽、始動用空気配管、燃料移送ポンプ、燃料小出槽、燃料供給配管及び制御盤について、外観確認を実施し異常のないことを確認した。なお、基礎部の確認については、目視による確認に加え、全ての基礎ボルト及び基礎コンクリートに係る打診確認を行った。表 5.1 に外観等の確認内容及び確認結果を示す。

5.3 商用電源喪失時における非常用発電機の作動状況確認

5.3.1 非常用発電機の自動起動及び自動負荷投入

非常用発電機の自動起動及び自動負荷投入が正常に行われたことを運転履歴により確認した。健全性を判断した履歴内容を以下に示す。

- ・非常用低圧母線の不足電圧継電器の動作信号を安全保護設備が正常に検知している。
- ・安全保護設備が不足電圧信号を 2 out of 3 論理で正常に判定している。
- ・非常用母線電圧低下事象を正常に発信している。
- ・非常用パワーセンターの商用電源系統を確実に遮断している。
- ・非常用発電機が正常に自動起動している。
- ・非常用発電機の主幹遮断器が正常に投入されている。
- ・非常用低圧母線の不足電圧継電器の動作が解除され、正常に電圧が確立している。
- ・1 段階目～6 段階目の負荷自動投入が正常に開始されている。
- ・所定の負荷の自動起動を確認している。

5.3.2 運転諸元等の確認

商用電源喪失に伴う非常用発電機の起動から、商用電源の復電に伴う停止までのガスタービンエンジンの運転状況、発電状況、燃料移送状況、始動用空気槽への充填状況について、概ね 2 時間毎の巡視点検の実施により確認した。

ガスタービンエンジンの健全性については、異音・異臭、燃料及び潤滑油の漏えいが無いことの確認及び潤滑油温度、潤滑油圧力、排気温度及び回転数が許容範囲で安定していることの確認を実施した。確認の結果、特段の異常は認められなかった。さらに、東日本大震災発生前に確認した値と比べて、有意な差異がないことについての確認も実施した。確認の結果、特段の異常は認められなかった。

発電機の健全性については、発電電圧、発電電流、発電電力、発電周波数及び発電力率が許容範囲で安定していることの確認を実施した。確認の結果、特段の異常は認められなかった。

主燃料槽から燃料小出槽までの燃料移送については、東日本大震災発生後において、燃料小出槽への給油を開始する規定量を下回らず、燃料移送ポンプの自動運転により、常に一定量の燃料を移送できていたことを確認した。

始動用空気槽への空気の充填については、始動用空気圧縮機の自動運転により、所定の圧力で始動用空気槽の圧力が保持されていることを確認した。

5.4 要求機能の適合性確認

H T T R の非常用発電機は、商用電源喪失時において 50 秒以内の電圧確立が設置許可申請書上、要求されている。

東日本大震災後においても、要求されている電圧確立性能が維持されていることを確認する為、機器及び基礎部の健全性確認及び無負荷運転によるガスタービンエンジン等の健全性確認が終了した後の平成 24 年 12 月、商用電源喪失事象を模擬することによる停電試験を実施した。停電試験により、実負荷にて非常用発電機を自動起動させ、電圧確立時間を確認したところ、A 号機 33.0 秒、B 号機 35.0 秒であり、要求時間 50 秒以内に対して十分満足する結果であった。また、震災発生前の施設定期自主検査では、A 号機 34.2 秒、B 号機 40.9 秒の電圧確立時間を確認しており、東日本大震災発生前後における要求性能の低下はないことについても確認できた。

5.5 ガスタービンエンジン、発電機及び燃料系統の詳細調査

5.5.1 定期点検における重点確認項目

非常用発電機設備については、概ね 1 年毎に定期点検を実施することで性能の維持を図っている。東日本大震災発生後、最初に実施する定期点検の機会を捉え、東日本大震災の強く長時間の揺れ並びに商用電源喪失に伴う長時間連続運転の影響把握に重点をおいた確認を実施した。以下に重点的に確認した項目を示す。それ以外の確認項目及び確認結果について表 5.2.1 及び表 5.2.2 に示す。

○ガスタービンエンジン

- ・配管接続部からの漏えいの有無
- ・タービン及びインペラの異常等の有無
- ・フィルターの目詰まりの有無
- ・燃焼器内における燃焼状況
- ・無負荷運転による運転諸元

○発電機

- ・ 異常な振動
- ・ 軸受温度の異常上昇
- ・ 回転子と固定子間の空隙
- ・ ガスタービンエンジンとの接続状態
- 燃料移送ポンプ
 - ・ 自動起動及び自動停止
 - ・ 給油完了時間
- 燃料小出槽
 - ・ 燃料小出槽におけるスラッジの堆積状況
- 始動用空気圧縮機
 - ・ 自動起動及び自動停止
 - ・ 完全充気時間

5.5.2 ガスタービンエンジンに係る確認結果

ガスタービンエンジンの構造図を図 5.1 に示す。ガスタービンエンジンは、2 段から構成される遠心圧縮機（1 段インペラ及び 2 段インペラ）により、給気ダクトから外気を吸引・圧縮して燃焼筒に圧縮空気を送る。これと同時に、エンジン駆動の燃料ポンプが回転することで燃料を燃焼室に送油し、燃料噴射ノズルにより霧化させることで、点火プラグによる点火が行われる。燃焼ガスは、3 段から構成される軸流タービン（タービンブレード、タービンノズル）を回転させることにより、車軸を駆動する。車軸は、カップリングを介し発電機の主軸を駆動する。

重点的に確認した項目を以下に示す。

1) 配管接続部からの漏えいの有無

東日本大震災の強い揺れが燃料配管、潤滑油配管及び始動用空気配管に作用することによる漏えいを懸念し、配管部、フランジ部及びオイルシール部等からの漏えい・滲みが無いことの確認を実施した結果、異常は認められなかった。

2) タービン及びインペラの異常等の有無

東日本大震災の強い揺れにより、ダクト内の塩害による腐食片等が剥がれ落ち、ガスタービンエンジン内に吸入されることで、タービン等の回転部品に傷等を発生させることを懸念した。健全性は、ガスタービンエンジン内にボアスコープを挿入することによる目視により確認した。確認の結果、最も入口側となる 1 段タービンブレード、1 段タービンノズル、1 段インペラの翼端に、傷、割れ、打痕及び変形等の異常は認められなかった。

併せて、潤滑油フィルターを分解することによる目視確認を実施したところ、潤滑油フィルターへの金属粉及び金属片の付着は認められなかった。

3) フィルターの目詰まり状態

ガスタービンエンジン入口に設置されている燃料フィルターの状態を確認した結

果、スラッジ等による重度の目詰まりを確認した。なお、燃料フィルターについては、点検毎に新品と交換しており、これまでの点検においてはスラッジの付着は確認していない。なお、ガスタービンエンジンの潤滑油系統に設置しているオイルフィルターの状態を確認した結果、金属粉あるいはオイルスラッジ等の目詰まりは認められなかった。

4) 燃焼器内の燃焼状態等

東日本大震災発生直後の商用電源喪失においては、強く長時間の地震の揺れの中でガスタービンエンジンが起動し、かつ長時間連続運転を強いられたことから、ガスタービンエンジンの燃焼状況を確認した。確認は、燃焼器ライナーをガスタービンエンジン本体から取り外すことにより目視確認を実施した。確認の結果、燃焼器ライナー内壁に設置されている冷却構造部において、割れ状の減肉が確認された。なお、H T T Rにおいては、長時間連続運転時間に起因する熱ストレスを原因とした燃焼器ライナースカート部の減肉を、これまでの運転において経験している。

減肉部の先端は白い粉状となっており、更に減肉の発生は周方向に対して偏りが確認されていることから、燃焼器ライナー内において偏った高温の温度分布が発生したものと予想できる。なお、東日本大震災発生前の点検では、これらの発生を確認していないことから、東日本大震災を契機に、短時間での偏った高温の温度分布が発生したものと考えられる。減肉の様子を図5.2に示す。減肉の詳細については「6. 燃焼器ライナーの減肉」に詳述する。

ガスタービンエンジンの燃焼器ライナー内に燃料を噴霧する燃料噴射ノズルの外観を確認したところ、燃料噴射孔近傍に煤の堆積を確認した。燃焼器ライナー冷却構造部に、周方向に偏った減肉を確認していることから、燃料噴霧不良に起因する偏った燃焼不良を想定し、燃料噴霧孔内の異物の噛み込み等が生じていないことを確認するための噴霧試験を実施した。

燃料噴射ノズルは、ガスタービンエンジンの起動領域にて使用するプライマリー燃料系統、定格領域にて使用するメイン燃料系統から構成されており、プライマリー燃料系統に係る噴霧試験を現地にて実施した。メイン燃料系統は、燃料噴霧圧力が高圧となることから、試験機関において噴霧試験を実施した。

噴霧試験の結果、プライマリー燃料系統及びメイン燃料系統ともに、燃料噴霧角度及び噴霧の均一性に問題は確認されなかったことから、燃料噴射孔内における異物の噛み込み及びスラッジ等による流路閉塞等は生じていないと判断した。メイン燃料系統に係る噴霧試験の詳細については「6. 燃焼器ライナーの減肉」に詳述する。

5) 無負荷運転による運転諸元

ガスタービンエンジンの無負荷運転に係る運転諸元を表5.3に示す。

始動用空気系統の健全性については、ガスタービンエンジンの自立回転数及び定格回転数到達時間により確認した。これについては、ガスタービンエンジンに圧縮空気を送り込むエアスターターの作動不良あるいはエアスターターに適切な圧力の圧縮空気を送り込む減圧弁等の動作不良が発生すると、ガスタービンエンジンの自立回転

数（55%）及び定格回転数（100%）到達時間が大きく変化することによるものである。確認の結果、各々の回転数到達時間は全て許容範囲内にあり、東日本大震災発生後における性能低下は認められなかった。

タービンプレード及びタービンノズルの健全性については、起動直後の排気最高温度及び定格出力運転における排気ガス温度等により確認した。起動直後における排気最高温度により健全性を確認することについては、タービンノズル等に傷及び変形が生じると、排気の流れが乱れると共に燃焼バランスが崩れ、起動時の排気最高温度が高温度となる知見に基づくものであり、定期的実施している試運転においても、エンジンの劣化状況を把握する手段の一つとして監視強化項目としている。燃焼用空気を圧縮するインペラの健全性については、定格出力運転時の空気圧縮機出口圧力により確認した。確認の結果、排気最高温度、排気温度及び空気圧縮機出口圧力等は全て許容範囲内にあり、東日本大震災発生を契機とした性能低下は認められなかった。

定格出力近傍におけるガスタービンエンジン全体の健全性については、異常な振動の有無、潤滑油及び燃料の漏えいの有無、潤滑油温度、潤滑油圧力、軸受部温度等により確認した。確認の結果、異常な振動及び漏えいは認められず、また、温度及び圧力に係るデータについても全て許容範囲内であり、東日本大震災発生後における性能低下は認められなかった。

回転軸の摺動部及び軸受部の健全性については、停止指令発信後から 5%までの回転数到達時間及びエンジンの完全停止時間により確認した。確認の結果、各々の時間は全て許容範囲内にあり、東日本大震災の強い揺れに起因する性能低下は認められなかった。

5.5.3 発電機に係る確認結果

図 5.3 に発電機の構造図を示す。

東日本大震災の強い揺れによる発電機の軸心ずれ、軸受の回転不良を懸念し、無負荷運転時における振動測定、軸受部の上昇温度測定及び回転子と固定子間の空隙測定を実施した結果、全ての計測値は許容値を満足しており、東日本大震災前に確認した計測値と大きく変化していないことを確認した。表 5.4.1、表 5.4.2 に軸受部上昇温度及び振動測定結果、表 5.5.1、表 5.5.2 に回転子と固定子間の空隙測定結果を示す。これらの結果から、東日本大震災の強い揺れに対する影響はなかったものと判断する。

5.5.4 燃料移送ポンプ等に係る確認結果

燃料小出槽内の燃料が 585L に到達後、燃料移送ポンプが自動起動し、1850L まで給油後に自動停止することを作動確認により確認した。また、吐出圧力等の運転諸元及び燃料小出槽への給油完了時間も正常であることを確認した。従って、東日本大震災発生後においても、燃料の補給要求残量を下回らず、常に一定量の燃料を移送していたものと判断する。なお、燃料小出槽からガスタービンエンジンまでの燃料移送については、信頼性確保の観点から、ポンプを有さずに圧力差のみでの送油となる。

5.5.5 燃料小出槽に係る確認結果

燃料小出槽内のA重油を主燃料槽へ返油し、燃料小出槽の内部確認を実施したところ、底部にスラッジの堆積を確認した。燃料小出槽については、定期点検にて槽底部の発錆状況を確認しており、東日本大震災発生前の点検においてはスラッジの堆積は確認していないことから、東日本大震災後にスラッジは堆積したものと判断した。また、主燃料槽と燃料小出槽に設置している燃料フィルタの状態を確認したところ、ガスタービンエンジンの燃料フィルタと同様、スラッジによる重度の目詰まりを確認した。なお、燃料フィルターについては、点検毎に新品と交換しており、これまでの点検においてはスラッジの付着は確認していない。

5.5.6 始動用空気圧縮機に係る確認結果

始動用空気槽内の圧力が 2.65MPa 到達後、始動用空気圧縮機が自動起動し、2.94MPa まで充填後に圧縮機が自動停止すること及び始動用空気槽への充気完了時間も正常であることを確認した。始動用空気圧縮機の自動運転に係る性能、圧縮性能の健全性が維持されていることが確認できたことから、東日本大震災発生後における始動用空気の充填は正常に行われたものと判断する。

5.6 調査結果のまとめ

東日本大震災の強い揺れによる設備への影響の確認に重点を置いた調査を実施した結果、以下に示す事項を確認できた。

- ・ 東日本大震災後においても、非常用発電機の要求機能である電圧確立時間は確実に担保されていた。
- ・ 東日本大震災の強い揺れによる、機器の異常は認められなかった。
- ・ 商用電源喪失後の非常用発電機の自動起動、自動負荷投入、起動後のガスタービンエンジンの運転諸元及び発電機の発電諸元は健全であった。
- ・ 燃料移送ポンプの始動用空気圧縮機等の補機類は、健全に性能を維持していた。
- ・ 燃焼器ライナーの減肉、燃料噴射ノズルの汚損を確認した。これらは、東日本大震災発生前には発生を確認していないことから、東日本大震災を契機に短時間で発生したものと推定できる。また、減肉の様子は、運転時間の蓄積により確認される減肉とは明らかな差異を有する。
- ・ 燃料フィルターにスラッジによる重度の目詰まりを確認したと共に、燃料小出槽の底面にスラッジの堆積を確認した。主燃料槽と燃料小出槽の間に設置している燃料フィルターに目詰まりが認められたことは、主燃料槽の底部にスラッジが堆積していることを示す事実である。なお、スラッジの吸入防止対策については、燃料吸込口と燃料槽底面との間に距離を確保し、また、燃料の吸入方向を上方からとする吸入防止対策を施しており、これまでの点検において、スラッジの吸入を確認した経験はない。従って、東日本大震災のような強く長時間の揺れに対しては、これまでのスラッジ吸入防止対策では不十分であることが判明した。

表 5.1 外観等確認内容及び結果

確 認 対 象	確 認 内 容	確認結果
ガスタービン	・ボルト類（基礎、据付、カップリング）の変形及び緩み ・発電機接続部（カップリング）の隙間 ・配管及びフランジ部の変形 ・パッケージの変形 ・基礎コンクリートの割れ・変形 ・ケーブル接続部の破損 ・給気及び排気ダクトの破損・変形	良好
発電機	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・パッケージの変形 ・ケーブル接続部の変形 ・ケーブルダクトの変形	
始動用空気圧縮機	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・基礎コンクリートの割れ・変形 ・ケーブル接続部の破損 ・架台（ベース）の変形 ・計装配管接続部の脱落	
燃料移送ポンプ	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・基礎コンクリートの割れ・変形	
始動用空気槽	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・基礎コンクリートの割れ・変形 ・計装配管接続部の変形	
燃料小出槽	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・基礎コンクリートの割れ・変形 ・支持架台の変形	
始動用空気配管 燃料供給配管	・サポートの変形 ・ボルト類（基礎、Uボルト）の変形及び緩み ・配管の変形 ・フランジ部の隙間寸法 ・フランジボルトの変形 ・弁類取付架台の変形 ・計装配管接続部の変形	
自動始動盤 発電機制御盤	・ボルト類（基礎、据付）の変形及び緩み ・基礎コンクリートの割れ・変形 ・架台（ベース）の変形 ・計器類及びコネクタの脱落 ・ケーブル端子台の破損	

表 5.2.1 重点確認項目以外の確認項目及び結果(ガスタービンエンジン)

対 象	確 認 項 目	確認結果
軸継手	カップリングボルトの弛み、脱落の有無確認	良好
燃料系統	燃料小出槽加温ヒーター作動確認	
	アクチュエーター類の作動確認及び抵抗測定	
	燃料コントローラの作動確認	
	電磁弁の抵抗測定及び作動確認	
	燃料配管加温ヒーターの絶縁抵抗測定及び作動確認	
	燃料昇圧弁の起動時燃料圧力測定	
潤滑油系統	潤滑油ポンプの漏油確認	
	圧力調整弁の漏油確認	
	温度調整弁の作動確認	
	オイルクーラーの作動確認	
	圧力スイッチの作動確認	
	測温抵抗体の抵抗測定	
	アキュムレータブラダに係る油圧調整及び漏油確認	
起動系統	エアスターターモーターの作動確認	
センサー類	接続状態確認及び抵抗測定	
	入出力特性確認	
給排気系統	給気・排気ファンの作動確認	
点火系統	スパークの健全性確認	
	エキサイター及び高圧ケーブルの損傷	
計器	入出力特性確認	
保護装置	設定値確認及び警報出力確認	

表 5.2.2 重点確認項目以外の確認項目及び結果(発電機)

対 象	確 認 項 目	確認結果
固定子	コイル部の目視点検	良好
	コイルエンド部の変形・変色	
	コイル締付け紐の緩み・切断の有無	
	絶縁物の割れ、枯れ	
	絶縁抵抗測定	
	スペースヒータの作動	
回転子	バランスウェイトの緩み	
	コイルの汚損及び変色の有無	
	絶縁抵抗測定	
励磁機	リード線の損傷及び断線の有無	
	コイルの変色及び変形の有無	
	絶縁抵抗測定	
主回路	絶縁抵抗測定	
計器	入出力特性確認	
保護装置	設定値確認及び警報出力確認	
自動電圧調整器	電圧調整可能範囲の確認 発電電圧の安定性確認 相電圧のバランス確認	

表 5.3 無負荷運転時の運転諸元 (ガスタービンエンジン)

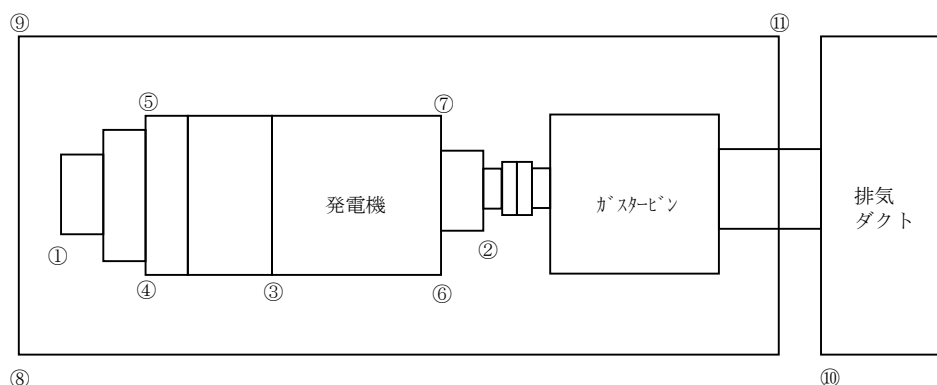
号機	エンジン	確認時期	圧 力		温 度				回転速度 (%)	回転数到達時間 (秒)			電圧確立時間 (秒)	
			潤滑油 (MPa)	空気圧縮機出口 (MPa)	タービン出口軸受潤滑油 (°C)	タービン出口排気ガス (°C)	マニホールド油温 (°C)	排気ガス最高温度 (°C)		55 %	100 %	5 %		完全停止
A 号機	No. 1	地震前	0.29 ~ 0.39MPa	0.54 ~ 0.83MPa	<125°C	<590°C	<105°C	<780°C	100~103%	35 秒以内	40 秒以内	—	≤50	
			0.35	0.61	94	300	71	530	102	21.2	32.5	141	266	35.1
	No. 2		0.35	0.61	89	290	72	540						
	No. 1	地震後	0.34	0.57	112	305	74	550	102	20.8	32.3	156	271	34.9
	No. 2		0.33	0.57	108	300	74	510						
B 号機	No. 1	地震前	0.35	0.60	96	300	72	530	102	21.6	37.4	131	249	39.2
			0.36	0.61	101	300	72	530						
	No. 1	地震後	0.34	0.58	108	300	75	510	101	21.0	34.1	127	243	36.6
			No. 2	0.34	0.58	118	310	75						

完全停止時間 : 停止操作からガスタービンエンジンの回転軸が完全停止する時間

東日本大震災前 : H21. 9. 30~H21. 10. 7 実施

東日本大震災後 : H23. 7. 1 ~H23. 7. 8 実施

表 5.4.1 軸受部上昇温度及び振動測定結果（A号機）



振動測定（震災前：平成 21 年 10 月） 管理基準：150 $\mu\text{m(P-P)}$ 以下 単位： $\mu\text{m(P-P)}$

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
H	9.6	8.6	8.2	15.0	16.0	15.0	14.0	1.2	1.1	2.2	1.0
V	5.8	1.6	1.2	7.6	5.0	8.8	9.8	0.9	0.7	0.6	0.8
A	6.2	16.0	2.8	7.2	6.8	7.2	7.0	0.6	1.0	0.8	1.4

H:水平方向、V:垂直方向、A:軸方向

振動測定（震災後：平成 23 年 6 月） 管理基準：150 $\mu\text{m(P-P)}$ 以下 単位： $\mu\text{m(P-P)}$

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
H	15.0	11.0	9.8	5.6	4.3	4.0	5.0	2.2	2.2	1.41	1.6
V	5.4	15.0	10.6	8.6	4.1	11.0	9.2	2.2	2.0	0.6	1.6
A	5.0	16.0	11.0	3.8	3.8	1.6	3.4	1.8	3.2	3.0	1.2

H:水平方向、V:垂直方向、A:軸方向

軸受温度測定（震災前：平成 21 年 10 月） 単位： $^{\circ}\text{C}$

	①	②	気温
起動前	21.0	24.5	20.0
15 分後	26.5	33.5	19.0
30 分後	31.5	39.0	19.0

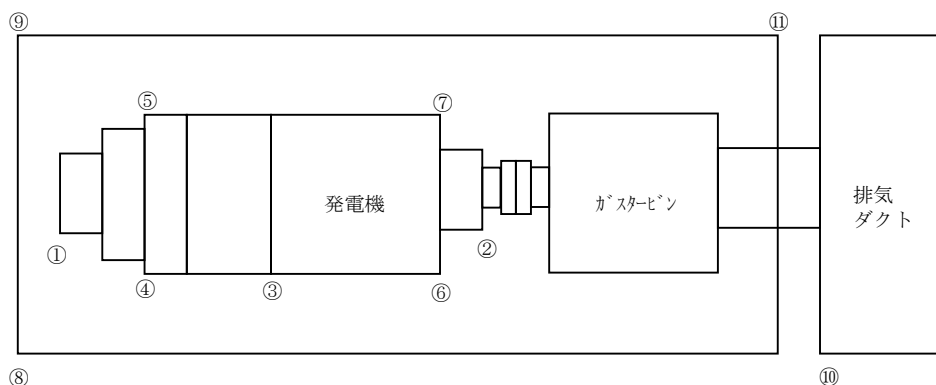
管理基準 80°C 以下

軸受温度測定（震災後：平成 23 年 6 月） 単位： $^{\circ}\text{C}$

	①	②	気温
起動前	15.0	11.0	9.8
15 分後	15.4	15.0	10.6
30 分後	15.0	16.0	11.0

管理基準 80°C 以下

表 5.4.2 軸受部上昇温度及び振動測定結果（B号機）

振動測定（震災前：平成 21 年 10 月） 管理基準：150 $\mu\text{m(P-P)}$ 以下 単位： $\mu\text{m(P-P)}$

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
H	8.4	6.6	14.0	14.0	14.0	14.0	12.0	1.8	3.6	1.8	3.2
V	7.6	3.6	0.8	4.8	11.0	6.0	12.0	0.8	1.0	1.0	0.9
A	2.2	4.4	1.2	2.6	2.6	2.6	2.8	1.6	1.4	1.2	1.0

H: 水平方向、V: 垂直方向、A: 軸方向

振動測定（震災後：平成 23 年 6 月） 管理基準：150 $\mu\text{m(P-P)}$ 以下 単位： $\mu\text{m(P-P)}$

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
H	8.0	10.0	14.0	4.8	4.2	2.8	2.8	3.0	2.4	4.2	4.0
V	7.2	6.4	4.2	9.8	5.2	12.0	12.0	0.4	0.8	0.2	1.0
A	3.6	5.2	1.2	1.8	1.6	2.0	2.0	1.4	1.8	2.0	3.2

H: 水平方向、V: 垂直方向、A: 軸方向

軸受温度測定（震災前：平成 21 年 10 月） 単位： $^{\circ}\text{C}$

	①	②	気温
起動前	25.0	29.0	23.0
15 分後	31.0	39.0	33.0
30 分後	37.0	43.0	21.0

管理基準 80°C 以下軸受温度測定（震災後：平成 23 年 6 月） 単位： $^{\circ}\text{C}$

	①	②	気温
起動前	24.0	25.0	22.9
15 分後	38.0	40.0	24.9
30 分後	43.0	46.0	25.2

管理基準 80°C 以下

表 5.5.1 回転子と固定子間の空隙測定結果（A号機）

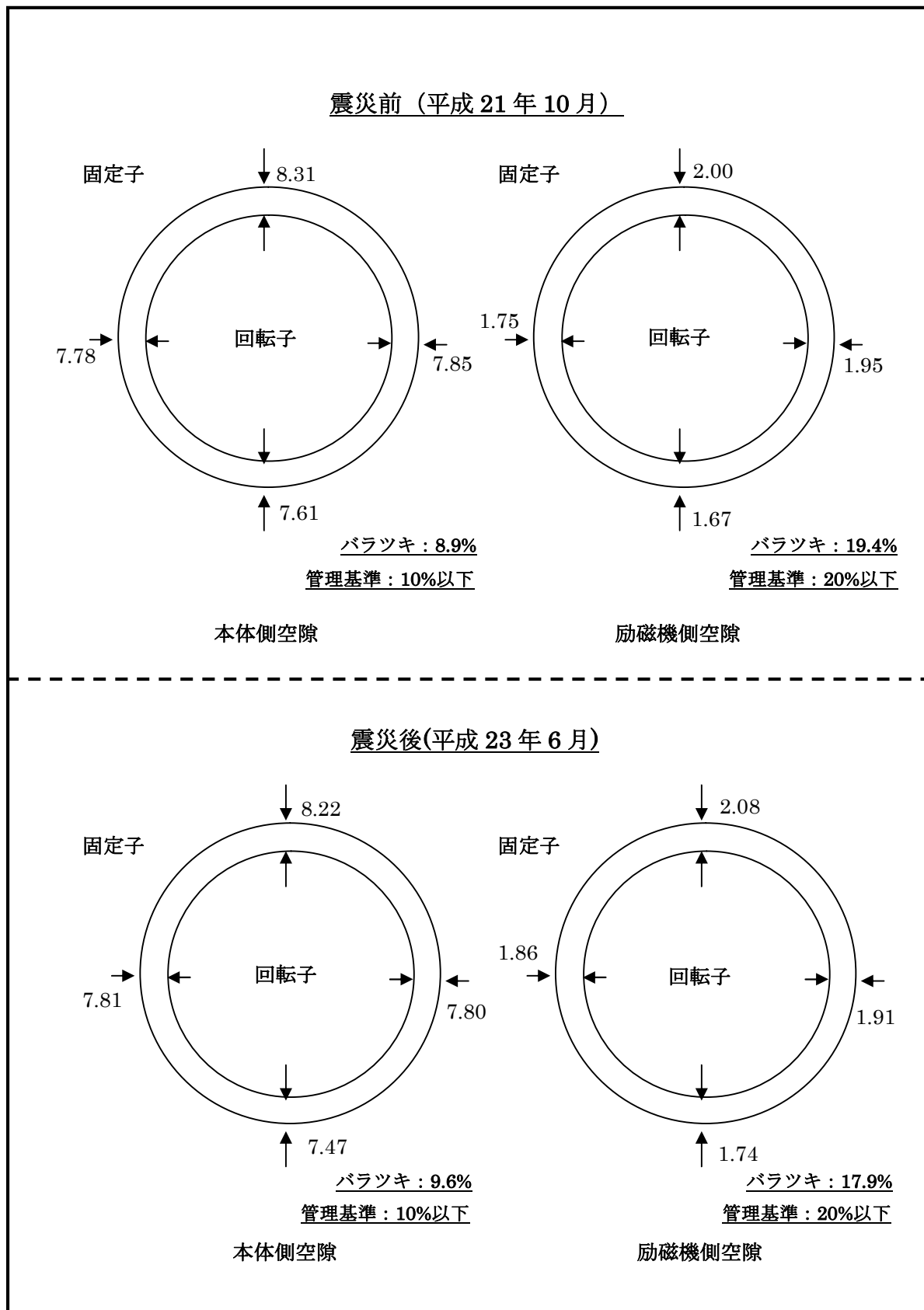
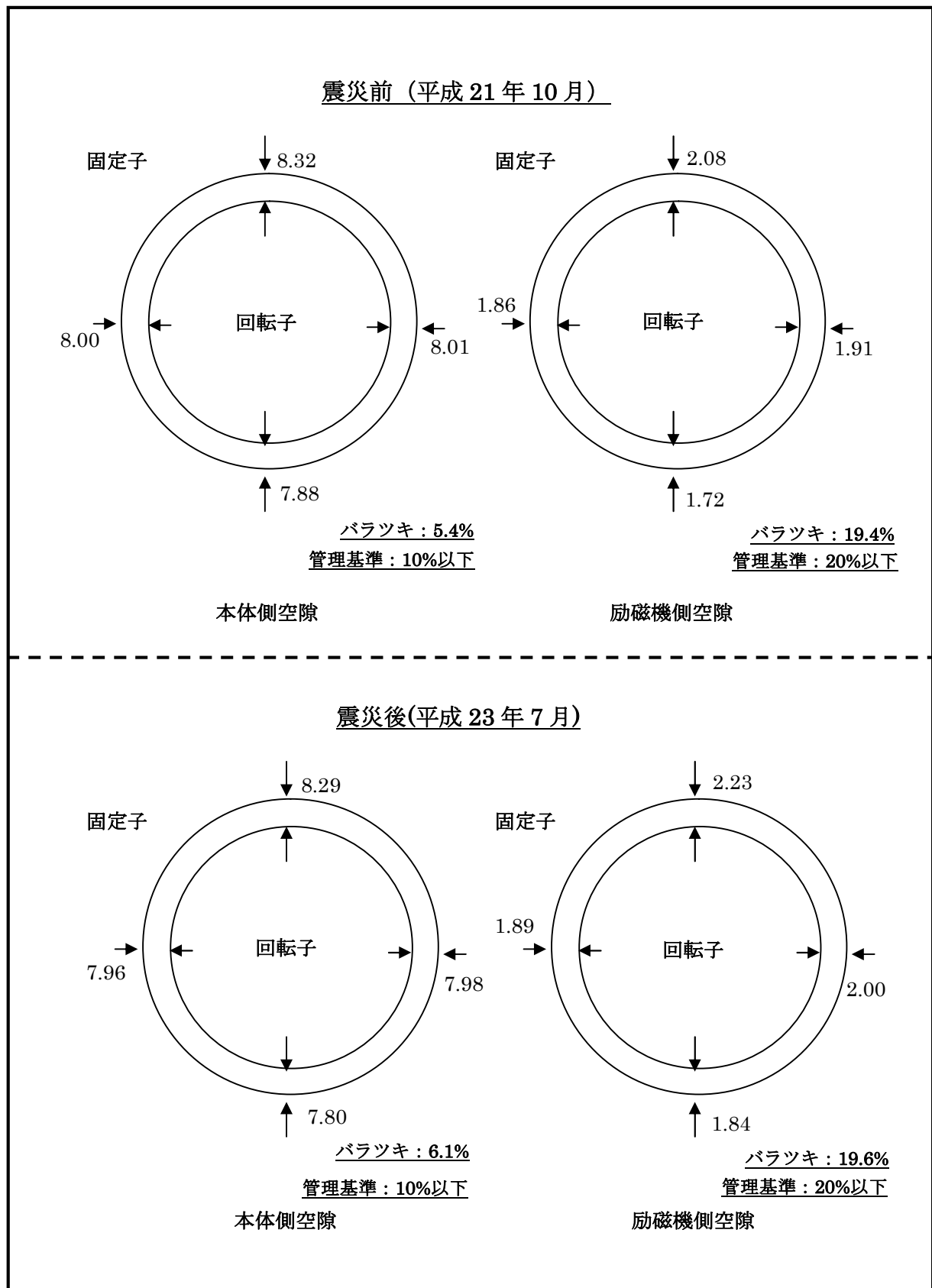


表 5.5.2 回転子と固定子間の空隙測定結果（B号機）



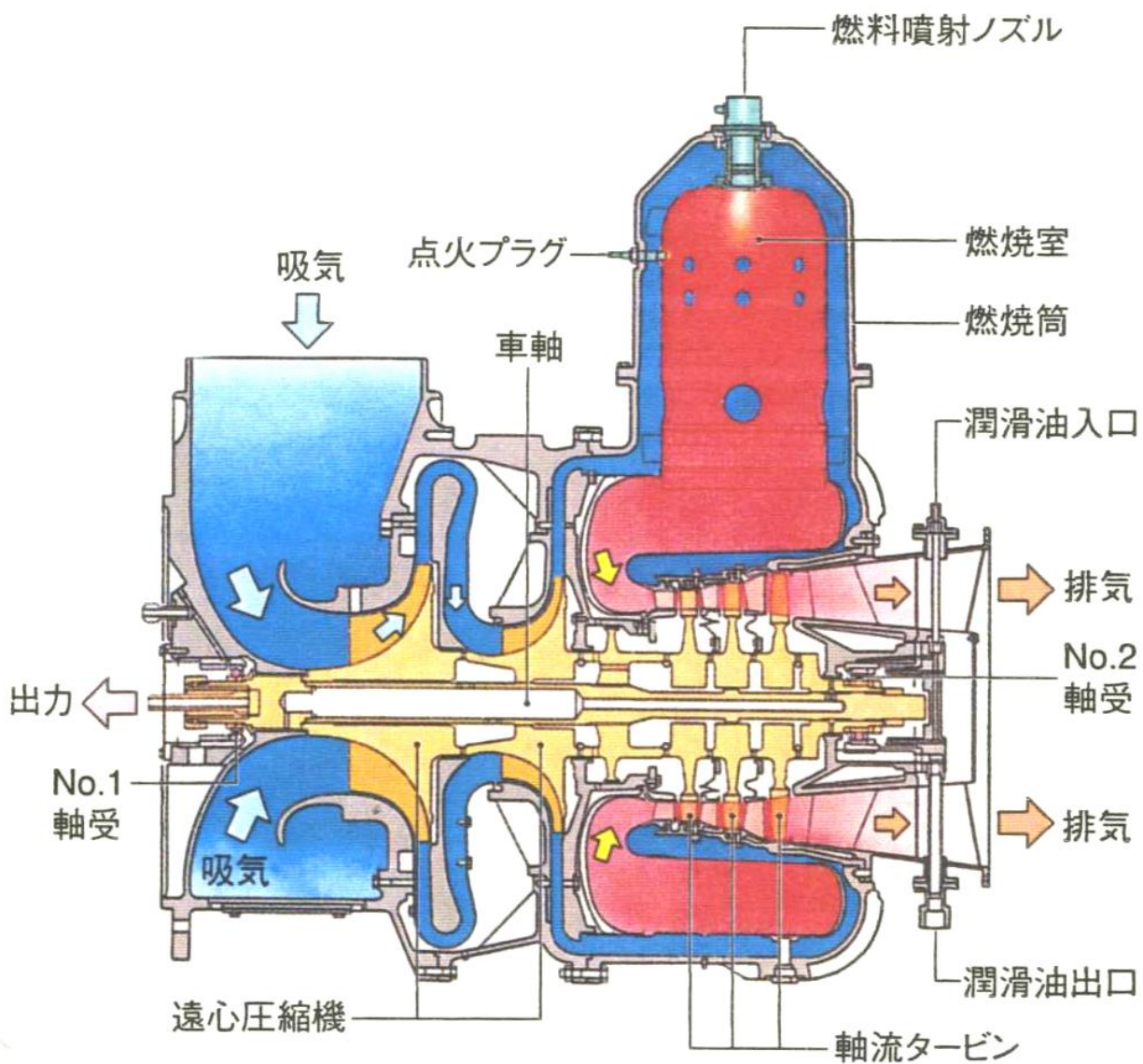


図 5.1 ガスタービンエンジン構造図

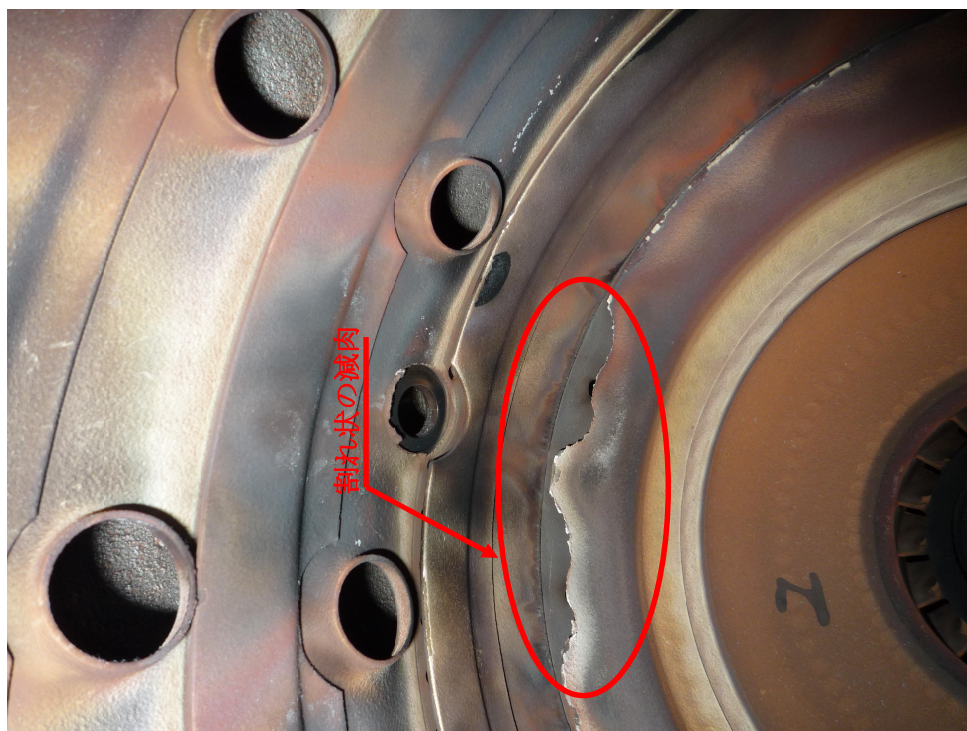
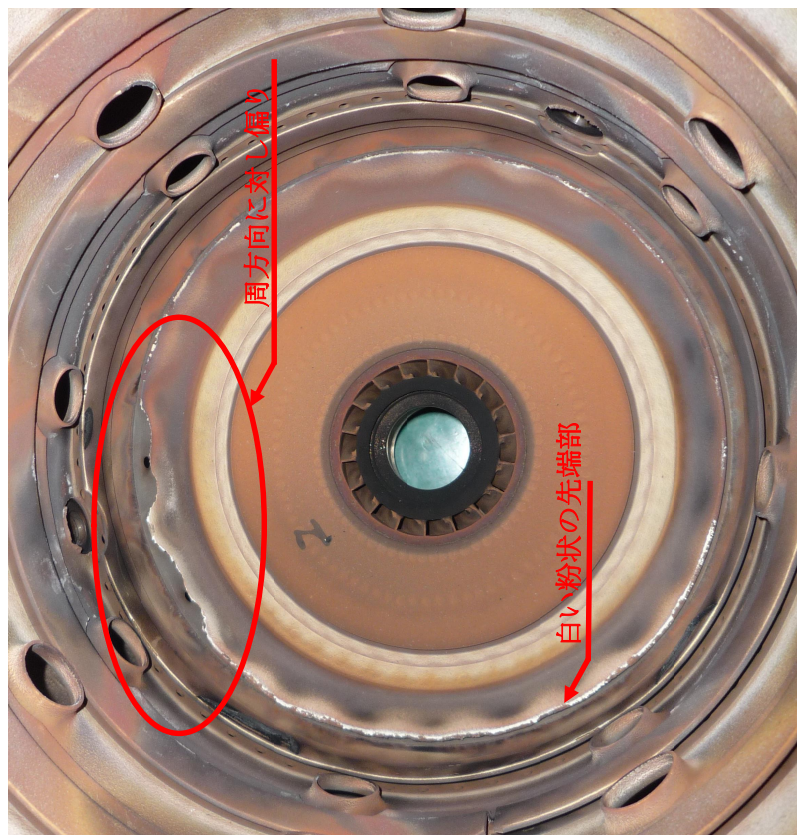


図 5.2 燃焼器ライナーの外観確認結果

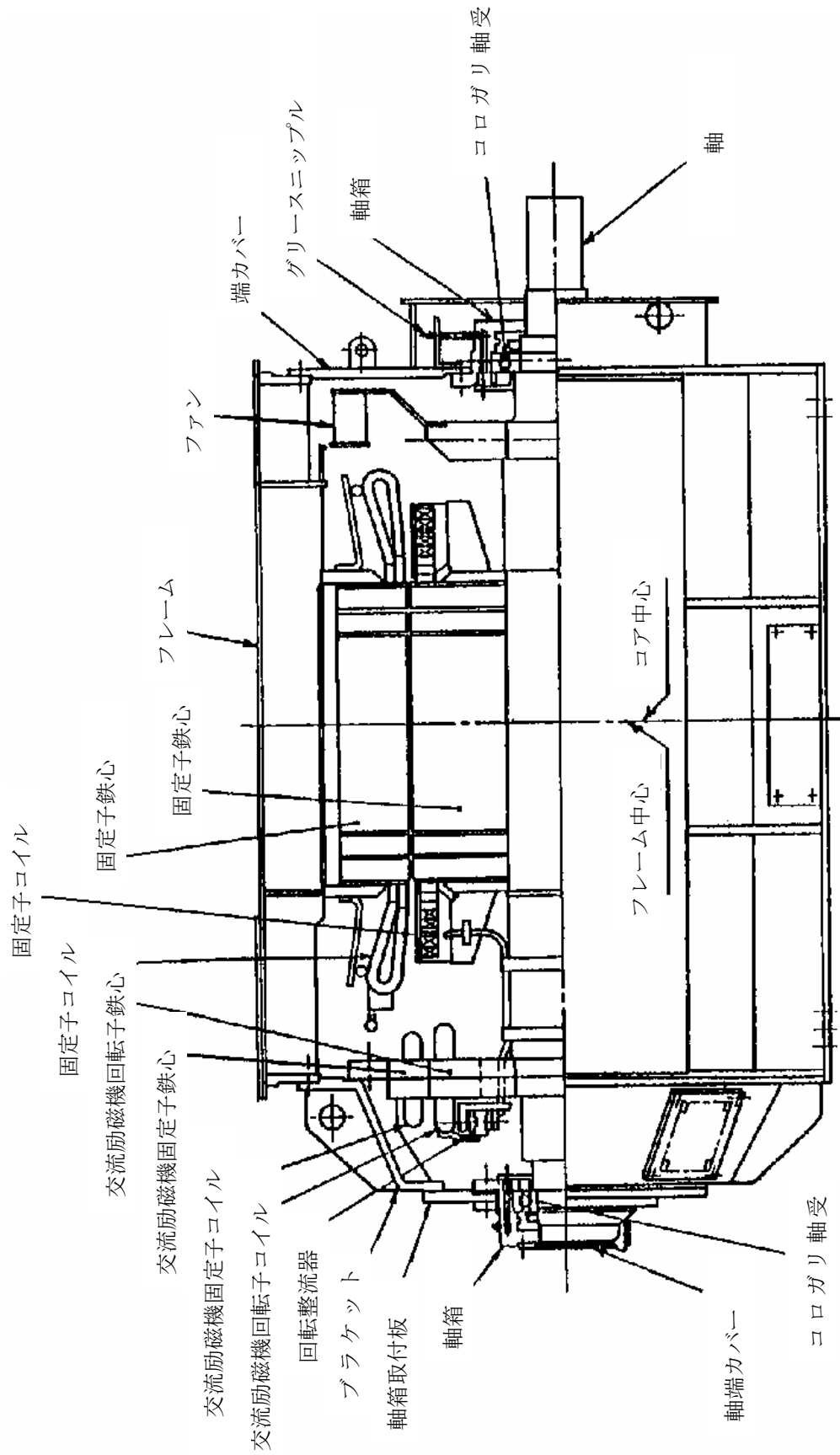


図 5.3 発電機の構造図

6. 燃焼器ライナーの減肉

6.1 燃焼器ライナーの構造

H T T R の非常用発電機は、A 号機及び B 号機により多重化しており、各号機当たり 2 機のガスタービンエンジンから構成するツインエンジン方式である。従って、各号機あたり 2 個の燃焼器ライナーを有している。図 6.1 に燃焼器ライナーの外観を示す。

6.1.1 燃焼器ライナー内における燃焼

図 6.2 に燃焼器ライナー内の燃焼ガスの流れを示す。

燃焼器ライナーは、燃焼器ケーシングの内側に取り付けられており、燃料噴射ノズルと共に燃焼室を形成する。また、燃焼器ケーシングと燃焼器ライナーの間には燃焼に用いる空気及び燃焼器ライナーの内壁を冷却する為の空気を流す空間を設けている。ガスタービンエンジン内の圧縮機から供給される圧縮空気は、燃焼器ライナーと燃焼器ケーシング間の環状通路を下方向から流入し、旋回空気流を形成することを目的に燃焼器ライナー上部に設けられてるスワラー及び燃焼器ライナー側部に設けられている燃焼空気孔から燃焼器ライナー内に流入する。また、燃料は、燃焼器上部に設置されている燃料噴射ノズルにより微粒化し、燃焼器ライナー内に噴射する。

燃焼は、燃焼器ライナー上部の燃焼領域にて火炎を形成する。燃焼領域では、スワラーを通過した旋回空気流によって燃焼ガスの循環渦が形成されており、循環渦により高温の燃焼ガスの一部が上方に戻ることににより燃焼反応を継続させる。燃焼に必要な空気は、燃焼器ライナーの側部に設けられた燃焼空気孔から供給される。燃焼によって高温となった燃焼ガスは、燃焼器ライナーの下部に設けられた希釈空気孔から流入する空気と混合することで適正温度まで温度を下げ、スクロールを通じてタービンへと導かれる。

6.1.2 燃焼器ライナーの冷却

燃焼の継続に伴い、燃焼器ライナーの燃焼領域の火炎温度は約 2000℃となる。一方、燃焼器ライナー母材の耐用温度は約 1000℃程度であることから、燃焼器ライナーへの火炎の接触温度を 1000℃以下に抑える必要がある。燃焼器ライナーの材料には、耐酸化性に優れたコバルト基の耐熱合金を採用するとともに、燃焼器ライナーの冷却構造上の対策及び燃焼器ライナー内面への遮熱コーティングの施工による材料強化により燃焼器ライナーの表面温度を下げ、熱負荷に対する必要な耐久性を確保している。燃焼器ライナーの冷却構造上の具体的な対策としては、燃焼器ライナー上部の燃焼領域に燃焼器ライナーの母材との間で二重構造を形成するクーリングプレートを設けている。クーリングプレートの構造及び冷却について図 6.3 に示す。クーリングプレートと燃焼器ライナー母材の間には、燃焼器ライナーの側部に設けられた冷却空気孔から取り入れた空気を流すことで対流冷却を行い、高温の燃焼ガスから燃焼器ライナーの母材を保護する。更

に、クーリングプレートを通じた空気には、燃焼器ライナーの内壁全体を空気で覆うことにより、高温燃焼ガスの外層への直接接触を極力低減し、燃焼器ライナー母材の減肉を防止するフィルム冷却効果を期待している。このように、対流冷却効果及びフィルム冷却効果の２種類の冷却により、燃焼器ライナー内壁の冷却を図る共に高温の燃焼ガスが燃焼器ライナーの内壁に接触することを防止している。

6.1.3 H T T R の燃焼器ライナー

H T T R の非常用発電機は、大洗研究開発センターの受変電設備並びに H T T R 電気設備の定期的な保守に伴う計画停電期間において、建家内照明、放射線監視設備、換気空調設備並びに原子炉停止中においても機能維持が要求されている機器等に給電を行う事が要求されており、50 時間程度の連続運転を年 2 回程度実施している。

H T T R における非常用発電機は、起動回数に対して連続運転時間が長くなるという運用上の特徴を有しており、他産業の非常用ガスタービンエンジンの連続運転時間を鑑みると長時間である。因みに、長時間連続運転を実施する常用ガスタービンエンジンに係る高温部品は、非常用ガスタービンに比べ、冷却構造を強化することに加え、クリープ強度、耐酸化性能、耐腐食性能を向上させ、高寿命化に対応している。

これまでの点検においては、長時間の連続運転に起因する軽微な減肉をクーリングプレート部に確認している。従って、数十℃程度の冷却効果が期待できる遮熱コーティングを燃焼器ライナー内壁に施し、熱負荷に対する材料を強化することで、内壁の温度を低下させる対策を東日本大震災以前から図っている。なお、遮熱コーティングは、熱伝導率が低いセラミックを金属へ塗布することにより、内壁面への入熱量を下げ、燃焼器ライナーの内壁温度の低下を期待するものである。

6.2 燃焼器ライナーの点検

6.2.1 減肉の確認

東日本大震災後の定期点検にて、燃焼器ライナー内の燃焼状況等を確認したところ、A 号機及び B 号機に係る燃焼器ライナーの 4 個全てに減肉を確認した。減肉の形状は直線的かつ周方向に対し偏っており、特に、A 号機に係る燃焼器ライナーの減肉は顕著であった。確認した減肉の状態を図 6.4 に示す。

なお、減肉が確認された燃焼器ライナーは、平成 19 年（B 号機）及び平成 20 年（A 号機）に実施したガスタービンエンジンの分解点検に併せて新品に交換したものである。交換後から、A 号機は 88 時間、B 号機は 152 時間の運転時間が経過した後、燃焼器ライナーの状態を確認したところ、両号機とも減肉及び異常な変色は発生していないことを確認している。しかしながら、東日本大震災後の定期点検では、両号機ともに燃焼器ライナーの減肉を確認しており、新品の燃焼器ライナー交換後の健全性確認から減肉を確認するまでの運転時間は、A 号機 243 時間及び B 号機 187 時間、健全性が確認されてからの運転時間は、A 号機 155 時間、B 号機 35 時間と極めて短時間であった。表 6.1 にガスタービンエンジンの運転履歴を示す。なお、運転時間は、等価運転時間で管理している。等価運転時間については、エンジンの構成部品は、運転時間によるストレス（クリープ損傷等）及び起動・停止時のストレス（低サイクル疲労等）等により、ダメージが

蓄積されることから、部品交換及びガスタービンエンジンの分解点検の目安となる運転時間管理を運転時間と起動回数の蓄積損傷の考え方から算出したものであり、H T T Rにおいては、1回の起動を1時間として加味している。

平成19年（B号機）及び平成20年（A号機）の燃焼器ライナー交換時に、それまで使用してきた旧品の燃焼器ライナーについても減肉を確認している。ただし、この減肉には、均一な燃焼状態の下で長期間運転した場合に見られる一般的な減肉であり、約1500時間の運転時間が経過したものであることを鑑みれば、予め想定していた範囲内の劣化であるとのガスタービンメーカーの見解を得ている。

東日本大震災後に確認した減肉の様子は、長期間運転後に生じる減肉の様子とは明確な差異を有していることを確認した。減肉の様子の違いを図6.5に示す。1500時間の運転時間が経過後に交換した燃焼器ライナーは、対照的な焼け色及び磨耗が確認されたことから、均一な燃焼状態で運転していたことが推定できる。一方、東日本大震災後に確認した燃焼器ライナーの減肉の様子は、直線的かつ割れ状であり、割れの先端は白い粉状である。更に、減肉の発生部分は周方向に対する偏りを確認していることから、燃焼器ライナー内において、偏った極めて高温の温度分布が発生したものと判断できる。なお、東日本大震災発生前の点検では、これらを確認していないことから、東日本大震災を契機に、短時間での偏った高温の温度分布が発生し、減肉に至ったものとする。

なお、平成19年（B号機）及び平成20年（A号機）に交換した新品の燃焼器ライナーについては、非常用としては連続運転が長時間となるH T T Rの運用上の特徴を踏まえ、材料強度の向上を目的に遮熱コーティングを施している。この対策により、数十℃程度の温度抑制効果を期待できる。交換から150時間程度の運転時間が経過後の定期点検（平成21年10月実施）にて、燃焼器ライナー内壁の状態確認を実施したところ、局所的な高温部、変色、減肉等の異常は認められなかった。東日本大震災前に確認した燃焼器ライナー内壁の様子を図6.6.1及び図6.6.2に示す。

6.2.2 燃料フィルターの目詰まり等確認

燃焼器ライナーの減肉の他、燃料噴射ノズル噴霧孔周辺に煤状の堆積物、燃料フィルターのスラッジによる重度の目詰まり及び燃焼器ライナー内における固形物の付着をA号機及びB号機共に確認した。燃料噴射孔周辺に係る煤状の堆積物を図6.7、燃料フィルターの目詰まりを図6.8、燃焼器ライナーに付着していた固形物を図6.9に示す。

燃料噴射ノズルについては、定期点検にて外観確認及び燃料噴霧試験を実施している。これまでの点検において、煤状の物質が堆積していた事を確認した経験はなく、煤状の堆積物は、燃料の噴霧不良あるいは燃焼不良を予想できる事実であった。

スラッジによる目詰まりについては、フィルター収納筒底部での堆積も確認したことから、収納筒下部の燃料供給口からガスタービンエンジン内へのスラッジ吸入を懸念した。なお、フィルターについては、概ね1年毎に実施する定期点検毎に、新品に交換しているが、スラッジの付着を確認した経験はない。ガスタービンエンジンへのスラッジ吸入防止対策としては、燃料吸込口と燃料槽底面との間に距離を確保し、また、燃料の吸入方向を上方からとする措置を主燃料槽の設置時より施している。

燃焼器ライナーの内壁にて採取した固形物については、触手により非常に堅いことを

確認しており、更に一部に光沢を確認したことから、金属部品の溶融及びエンジン内部へ吸い込まれることによるタービン等回転部品への損傷を懸念した。

6.3 減肉の影響

燃焼器ライナーの冷却空気孔から流入した空気は、燃焼器ライナー内壁とクーリングプレートとの間を流れ、対流冷却効果により高温の燃焼ガスにさらされるクーリングプレートを冷却することで、燃焼器ライナーの内壁温度を低下させることを期待している。クーリングプレートが減肉することで、クーリングプレートが消失すると、高温の燃焼ガスが直接燃焼器ライナーの母材に接触することとなり、耐熱温度を超えることによる燃焼器ライナー母材の焼損が懸念される。従って、クーリングプレートの減肉を確認したことを受け、減肉の進行及び燃焼器ライナー交換の緊急性を評価した。また、減肉片及び燃焼器ライナー内壁に付着していた固形物がタービンへ吸入されることの影響についても検討した。

6.3.1 減肉の進行

減肉が確認された部分は、クーリングプレートの先端部である。冷却空気孔からの距離が最も離れている部分となることから、冷却空気の温度が最も高温となり、減肉部分に係る対流冷却効果は最も小さくなる。クーリングプレートの先端部は、減肉によりクーリングプレートが変形したことで冷却効果が更に低下し、燃焼ガスによる入熱量が増加することで減肉は進行するものと判断した。

6.3.2 減肉片及び固形物がタービンに与える影響

クーリングプレートの減肉片の影響については、高温酸化により脆くなったクーリングプレートは、先端から碎けながら減肉し、燃焼ガスを加速させるスクロールで更に細分化されると考えられ、タービンプレード及びタービンノズルに傷及び打痕等を発生させることはないとは判断した。先端から碎けながら減肉が進行することについては、減肉部の先端が白い粉状に減肉していることから判断した。なお、先端部が白い粉状となっていることについては、減肉によるクーリングプレートの対流冷却効果の低減により、先端部の高温酸化が促進され、先端部の温度が極めて高温になったことによるものと考えられる。

固形物の影響については、固形物が燃焼器ライナーの内壁から剥離した場合、燃焼ガスと共にスクロールにて加速され、タービン部に流出していくこととなるが、採取した固形物が非常に堅固であったことから、タービンプレード及びタービンノズル等への傷及び打痕等の発生を懸念した。東日本大震災後の定期点検にて、タービンプレード及びタービンノズルについて、ボアスコープによる外観点検を実施したところ、傷、変色及び打痕等の異常が発生していないことを確認した。この結果については、スクロールにおける燃焼ガスの加速中に細分化されるとともに、高速で回転しているタービンプレードにて粉碎されたことによるものと推定する。

6.3.3 燃焼器ライナー交換に係る緊急性評価

燃焼器ライナー交換の緊急性は、以下の観点から低いと判断した。

- ・クーリングプレートは十分残存しており、母材である燃焼器ライナーの内壁には

酸化・割れ等の兆候は認められなかった。

- ・クーリングプレートの減肉による対流冷却効果の減少により、空気孔近辺付近まで減肉は進行するが、クーリングプレート長が短くなる反面、上流からのフィルム冷却効果は大きくなり、空気孔近辺付近で減肉の進行は緩やかになると考えられる。
- ・クーリングプレートの減肉により、燃焼器ライナー母材である外層が露出し対流冷却効果は小さくなるが、燃焼器ケーシングと燃焼器ライナーとの間を流れる空気による冷却及びフィルム冷却により保護されることで、燃焼器ライナーの母材減肉までの時間的余裕は十分あるものと考えられる。

6.4 減肉に係る原因調査

6.4.1 調査項目

(1) 燃焼器ライナーの品質不良について

燃焼器ライナーの冷却構造に係る設計不良あるいは製造不良に起因する減肉を想定したが、以下に示す事項から、製造不良及び設計不良は考えられないと判断した。

- ・A号機及びB号機に係る燃焼器ライナー4台の全てに減肉を確認している。
- ・製造ロットが異なる燃焼器ライナーについても減肉を確認している。
- ・減肉が確認された燃焼器ライナーは、他産業においても使用実績が豊富であるガスタービンエンジン用のライナーであり十分な信頼性を有している。
- ・新品の燃焼器ライナーに交換してから、約150時間の運転時間が経過した後、外観確認を実施したところ、局所的な高温部、変色、割れ、減肉等の異常は認められなかった。

(2) ガスタービンエンジン内の圧縮機不良について

燃焼器ライナー内壁の冷却用空気量が減少し、クーリングプレートの高温酸化を促進することによる減肉の発生を想定した。

燃焼器ライナーの冷却用空気は、ガスタービンエンジン内部に設置された1段インペラ及び2段インペラにより高圧に圧縮される。その後、燃焼器ケーシングと燃焼器ライナーとの間の環状通路を下方向から流入後、燃焼用空気、燃焼ガスの冷却、ライナー内壁の冷却用空気として燃焼器ライナー内へ供給される。1段インペラ及び2段インペラの不具合による圧縮不良が生じると、燃焼器ライナーへの冷却用空気量が減少することでクーリングプレートの温度が上昇し、高温酸化による減肉が発生することとなる。しかしながら、東日本大震災後に実施した無負荷運転では、圧縮機出口圧力及び排気温度の値が許容範囲内であり、東日本大震災発生前に確認したデータと相違ないことを確認しており、圧縮機の不具合による燃焼器ライナーの冷却用空気の減少は考えられないと判断した。

(3) 燃料噴射ノズルの噴霧不良について

燃料の微粒化不良は、燃料の液滴粒径の増大を誘発し、結果、燃焼時間が長くなることにより、燃焼器ライナーの壁面温度を上昇させる。更に、噴霧角度の不均一化が発生

することで、燃焼領域の偏り及び燃焼温度分布の局所化を誘発する。従って、これらによる減肉の発生を想定した。なお、微粒化不良を発生させる要因としては、噴霧弁の製品不良、噴霧孔の異物噛込み及び燃料の品質不良が考えられる。

燃料噴射ノズルの製品不良については、新品の燃焼器ライナー交換後からA号機 88 時間、B号機 152 時間の運転時間経過後の東日本大震災前の定期点検において、減肉を確認していないことから製品不良は考えられない。

燃料噴射ノズル内の燃料噴霧孔の異物噛み込みについては、ガスタービンエンジン起動時の燃料圧力、定格運転時の燃料圧力毎に噴霧試験を実施し、噴霧角度の計測並びに噴霧の均一性等を確認することが有効であることから、東日本大震災時に使用していた燃料噴射ノズルを試験機関に持ち込むことによる噴霧試験を実施した。

燃料の品質不良については、燃料噴射ノズルの燃料噴霧孔に煤上の物質が堆積していたこと及び燃料フィルターに重度のスラッジの詰まりを確認していることから、東日本大震災発生時に使用していたA重油の性状分析を実施した。なお、スラッジについては、重油中の成分が、貯蔵中の温度、湿度や貯蔵期間等の要因により、重油中で溶解、分散せず貯蔵中に分離し、タンク底部にドライスラッジとして堆積したものであると考える。

(4) 燃焼器ライナーの内壁に付着していた固形物について

燃焼器ライナー内壁へ付着していた黒い固形物については、一部に金属質の光沢を持つ箇所を確認したことから、試験機関による材料分析を実施した。

6.4.2 調査結果

(1) 噴霧試験

東日本大震災発生時に使用していた燃料噴射ノズル 4 個について、試験機関による噴霧試験を実施した結果、異物の噛み込み並びに減肉との因果関係は確認できなかった。但し、噴霧した燃料は試験用燃料によるものである。

具体的には、噴霧試験では、東日本大震災発生時に使用していた燃料噴射ノズルを試験装置に取り付け、ガスタービンエンジン起動時の燃料圧力（プライマリー燃料圧力）、定格運転時の燃料圧力（メイン燃料圧力）を実際に加圧することで試験用燃料を噴霧し、噴霧角度、噴霧の対称性、流量特性、噴霧の均一性、燃料の内外部への漏えいの有無を確認した。更に、円周方向の噴霧量分布に偏りが無いことの確認を目的に、円周方向を 12 分割し、規定時間当たりの噴霧量を領域毎に計測した。噴霧試験の様子を図 6.10 に示す。

試験の結果、噴霧角度及び噴霧の対称性について規定値を逸脱する噴霧弁を確認したが、約 1500 時間のガスタービンエンジンの運転に使用した噴霧弁であることを考慮すると、外れ量は一般的な使用済み燃料噴射ノズルと同程度であり問題とはならない。その他、外観検査、流量特性確認、噴霧の均一性確認、噴霧量分布測定、燃料噴射ノズル内外部の燃料の漏えい確認の結果は、全て許容範囲内であることを確認できた。

(2) 燃料性状分析

試験機関における性状分析の結果、使用するA重油の性状管理を確実に実施しているにも拘わらず、動粘度（50℃）、10%残油残留炭素が管理値逸脱、密度（15℃）の管理値を逸脱近傍であることを確認した。即ち、性状分析の結果、東日本大震災の発生時に使用していたA重油は、規定値よりも重質分を多く含有していることが判明した。なお、動粘度は、燃料の粘性を示す指標であり、値が逸脱することにより、燃料噴射ノズルから噴射される燃料の霧化不良が生じる恐れがある。10%残油残留炭素量は、炭化生成物の指標として用いられるものであり、値の逸脱により炭化物及び煤が生成される恐れがある。なお、煤の発生は、放射熱が大きく、燃焼器ライナー内壁の温度を上昇させる輝炎を発生させる要因となる。密度（15℃）の逸脱は、着火性及び燃焼性の低下を低下させる恐れがある。

東日本大震災の発生時に使用していたA重油の性状分析結果を表6.2に示す。使用しているA重油については、日本工業規格に定められている第1種1号に係る性状規定に加え、同規格には定められていない密度（15℃）、目詰まり点、10%残油残留炭素値について、ガスタービンメーカーの推奨値を参考に性状管理を実施している。特に、動粘度（50℃）については、JIS基準値の1/10程度の管理値を定めて厳しく管理している。厳しい性状管理を行っているにも拘わらず、A重油中に重質分が多い原因としては、長期間の燃料貯蔵によって燃料槽の底部に堆積していた重質分が、東日本大震災の強く長時間の揺れにより攪拌されたものと判断した。

(3) 燃焼器ライナー内で確認した固形物

エネルギー分散型X線分析法により、固形物の主成分を特定した。材料分析の結果、検出された成分の97%以上が炭素、残り3%が酸素であることを確認した。また、金属質の光沢を持つ箇所についても、95%以上が炭素、4%が酸素、1%がナトリウム、塩素、カリウムであり金属成分は認められなかった。

主成分である炭素については、重質分を多く含むA重油が完全に燃焼せず残留し、ガスタービンエンジン停止後の残留燃料を炭化させたものと推定される。金属質の光沢を持つ箇所についても、光沢が無い部分と成分上の差異がないことから、非常に滑らかなカーボンの表面で光を反射し光沢を持っていたものであり、金属の部品が溶融したものではないと判断した。

6. 5 減肉の原因特定

(1) 調査等から得られた事実

- ・燃焼器ライナー及び燃料噴射ノズルの製造不良及び設計不良は考えられない。
- ・東日本大震災発生時、燃焼器ライナーに係る冷却用空気の供給は正常であった。
- ・燃料フィルターに重度のスラッジの目詰まりを確認している。
- ・燃料噴霧ノズルに煤状の堆積物を確認している。
- ・燃料噴射ノズル内に異物の噛み込み等は認められない。
- ・燃料は動粘度、10%残油残留炭素及び密度等の性状管理値の逸脱が認められ、重質分の多く含有している燃料であることを確認している。

- ・ 燃焼器ライナーに付着していた固形物は炭素であることを確認している。

(2) 重質分を多く含有している燃料を使用することの影響

- ・ 噴霧燃料の微粒化不良により噴霧角度を変化させ、着火性能を悪化させる。
- ・ 燃料の液滴粒径の増大により燃焼時間が長くなる。結果、火炎が壁面まで伸びることによって燃焼器ライナーの表面温度を上昇させる。
- ・ 輝炎の発生原因となる固体粒子（主に煤）を生成させ、輝炎からの輻射熱の影響により燃焼器ライナーの表面温度を上昇させる。なお、輝炎は、熱によって遊離した炭素から発せられる炎であり放射熱が大きい特徴がある。
- ・ ガスタービンエンジン停止後の残留燃料を炭化させ、燃料噴射ノズルの炭化物堆積、噴霧孔閉塞、燃焼領域の偏りを発生させる。燃焼器ライナー内壁において、炭素の固形物の付着を確認していることについては、重質分から生じる輝炎が発生し、クーリングプレート部の温度上昇を裏付けるものである。

(3) 原因の特定

動粘度は燃料の霧化不良による燃焼時間の増大、10%残油残留炭素量は煤等の炭化物の生成、密度は着火性能及び燃焼性能に影響するものであり、これらの性状悪化を確認している。さらに、燃焼器ライナーの周方向に対して局所的に偏った高温酸化による減肉、燃焼器ライナー内における炭素の固形物の付着、燃料噴射孔における煤の堆積を確認している。これらは、噴霧燃料の微粒化不良による燃焼時間の増大及び輻射熱の大きい輝炎の発生を裏付ける事実である。

従って、燃料性状が悪化した燃料による燃焼不良が、減肉の原因であると特定した。図 6.1.1 に減肉のメカニズムを示す。なお、B 号機に係る燃焼器ライナーの減肉に比べ、A 号機の減肉の程度が大きいことについては、東日本大震災発生時に A 号機は 72 時間 24 分、B 号機は 26 時間 42 分のガスタービンエンジンの運転を行っており、運転継続時間に依存しているものと判断する。

なお、A 重油の納入時において、動粘度、10%残油残留炭素の含有量等、燃料の性状管理を徹底しているにも拘わらず、高い濃度の重質分が検出されたことについては、長期間に渡る同一の A 重油の貯蔵及び結露等による水分との反応により、A 重油の成分が分離し、主燃料槽底部に沈殿したスラッジが東日本大震災の長時間の強い揺れで攪拌されたことによるものと判断する。水分が発生する要因としては、地下埋設による燃料槽内外の温度差による燃料槽内の気相部の結露、通気管の設置による湿気を含んだ外気の取り込みが考えられる。また、スラッジが堆積する要因としては、非常用発電機であるが故、常に相当量の A 重油を貯蔵した状態での待機を要求されており、同一燃料を長期間貯蔵することに起因するものと判断する。

6.6 減肉の対策

噴霧不良による燃焼器ライナーの減肉を防止する上で有効となる対策を以下に挙げる。

- ・ 適切な時期に主燃料槽内を清掃し、重質分を蓄積させないことで燃焼不良を防止する。
- ・ 重質分による燃焼器ライナー内壁の温度上昇を許容できるように、燃焼器ライナーの

耐熱性能の向上を図る。

6.6.1 対策の実現性

(1) 適切な時期での主燃料槽内清掃

燃料残量が少ない状態で実施することが、危険物の取扱い上及び産業廃棄物の低減の観点からも望ましいが、非常用発電機の要求機能上、常に相当量のA重油を貯蔵しておく必要があることに加え、主燃料槽底部に堆積するスラッジ量を正確に推定し、実施時期を特定することは難しい。また、残油量を有した状態での清掃については、燃料を一時的に仮設タンクあるいはタンクローリ等に移送・保管する必要があるが生じるが、保管に係る物理的な問題に加え、消防法に基づく危険物の取扱い上の観点からも現実的ではない。

(2) 燃焼器ライナーの耐熱性能向上

減肉は高温酸化現象であることから、燃焼器ライナー内壁の温度が高温になる程、減肉は進行する。減肉の発生並びに進行を抑制するためには、連続運転時間を制限するか、あるいは燃焼器ライナー内壁の温度を下げることで有効となる。再度の大地震発生時における長期間の商用電源喪失を想定すると、連続運転時間を制限することは本質的な改善とはならないことから、燃焼器ライナーの冷却構造をより強化した燃焼器ライナーへ仕様を変更することで、燃焼器ライナー内壁の温度を下げることにした。

仕様変更にあたっては、常用型のガスタービン発電機は、燃焼器ライナーの交換時期を決める損傷形態の一つとして、高温酸化によるクーリングプレートの減肉を想定していることに着目した。常用型のライナーは、対運転時間性能を向上させることを目的に、冷却構造の強化及び材料強度の強化が図られている。

具体的には、クーリングプレートの配置段数を増やすことで対流冷却及びフィルム冷却効果の向上を図っている。更に、配置段数を増やすことは、クーリングプレート間同士の距離が短くなることとなり、対流冷却及びフィルム冷却効果の持続性の向上も期待できる。また、燃焼器ライナーの内壁に遮熱コーティングを施すことにより耐熱性能の向上を図っている。常用型と非常用型の燃焼器ライナーに係る冷却構造の違いを図6.12に示す。

このライナーへの仕様を変更することができれば、冷却構造及び材料の強化を図ることができ、スラッジ吸入に対する耐熱性能の強化が実現できることとなる。この対策により、数百度程度の温度低下を見込め、スラッジの吸入に起因する温度上昇を想定しても減肉を防止することが可能となる。

6.6.2 対策の決定

スラッジ吸入による温度上昇を予め想定した上、燃焼器ライナーの耐熱性能を向上させることを主たる対策とし、燃料槽内の定期的な清掃を補完的な対策とした。

燃焼器ライナーの耐熱性能を強化することで、スラッジの吸入を想定しても、減肉を防止できることに加え、長時間連続運転の熱負荷によるクーリングプレートの減肉抑制を図ることが可能となった。なお、主燃料槽内のスラッジの蓄積状況の把握については、合理的な把握方法の検討に努めることとし、得られた知見に基づく適切な清掃時期を保全計画に反映していくことで、スラッジの堆積を可能限り抑制することを目指す。

表 6.1 ガスタービンエンジンの運転履歴

() 内の数字は累計値

対象号機	確 認		始動回数(回)	運転時間 (時間)	等価運転時間 (時間)
A 号機	平成 20 年 11 月 1 日	エンジン分解点検時	0 (3 8 3)	0 (1 1 2 9 . 8)	0 (1 5 1 2 . 8)
	平成 21 年 10 月 7 日	定期点検時	2 5 (4 0 8)	6 3 . 3 (1 1 9 3 . 1)	8 8 . 3 (1 6 0 1 . 1)
	平成 23 年 6 月 13 日	定期点検	4 3 (4 5 1)	2 0 0 . 4 (1 3 9 3 . 5)	2 4 3 . 4 (1 8 4 4 . 5)
	平成 23 年 3 月 11 日	東日本大震災発生時 (参考)	1	7 1 . 4	7 2 . 4
B 号機	平成 19 年 10 月 1 日	エンジン分解点検時	0 (3 8 0)	0 (1 0 9 4 . 9)	0 (1 4 7 4 . 9)
	平成 21 年 9 月 30 日	定期点検時	5 1 (4 3 1)	1 0 1 . 1 (1 1 9 6 . 0)	1 5 2 . 1 (1 6 2 7 . 0)
	平成 23 年 7 月 2 日	定期点検	3 5 (4 6 6)	1 5 2 . 5 (1 3 4 8 . 5)	1 8 7 . 5 (1 8 1 4 . 5)
	平成 23 年 3 月 11 日	東日本大震災発生時 (参考)	1	2 5 . 7	2 6 . 7

等価運転時間：
 運転時間によるストレス (クリープ損傷等) 及び起動時のストレス (低サイクル疲労等) を考慮した時
 間で 1 回の起動を 1 時間として加算している。

表 6.2 東日本大震災の発生時に使用していたA重油の性状分析結果

分析項目	単位	減肉確認後の分析結果		納入時の性状	JIS 基準	HTTR における管理値
		A 系	B 系			
密度 (15℃)	g/cm ³	0.862	0.866	0.8527	—	0.0865 以下
引火点	℃	84.5	84.0	83.0	60 以上	—
目詰まり点	℃	-17	-18	-22	—	過去 20 年間の現地最低気温以下
動粘度 (50℃)	C St	3.052	3.015	2.54	20 以下	2～2.8
硫黄分	wt%	0.07	0.08	0.04	0.5 以下	0.5 以下
灰分	wt%	<0.01	<0.01	0.01 以下	0.05 以下	—
水分	V/v%	こゑ跡 (<0.05)	こゑ跡 (<0.05)	0.05 以下	0.3 以下	—
10%残油残留炭素	wt%	0.89	0.83	0.33	—	0.55 以下

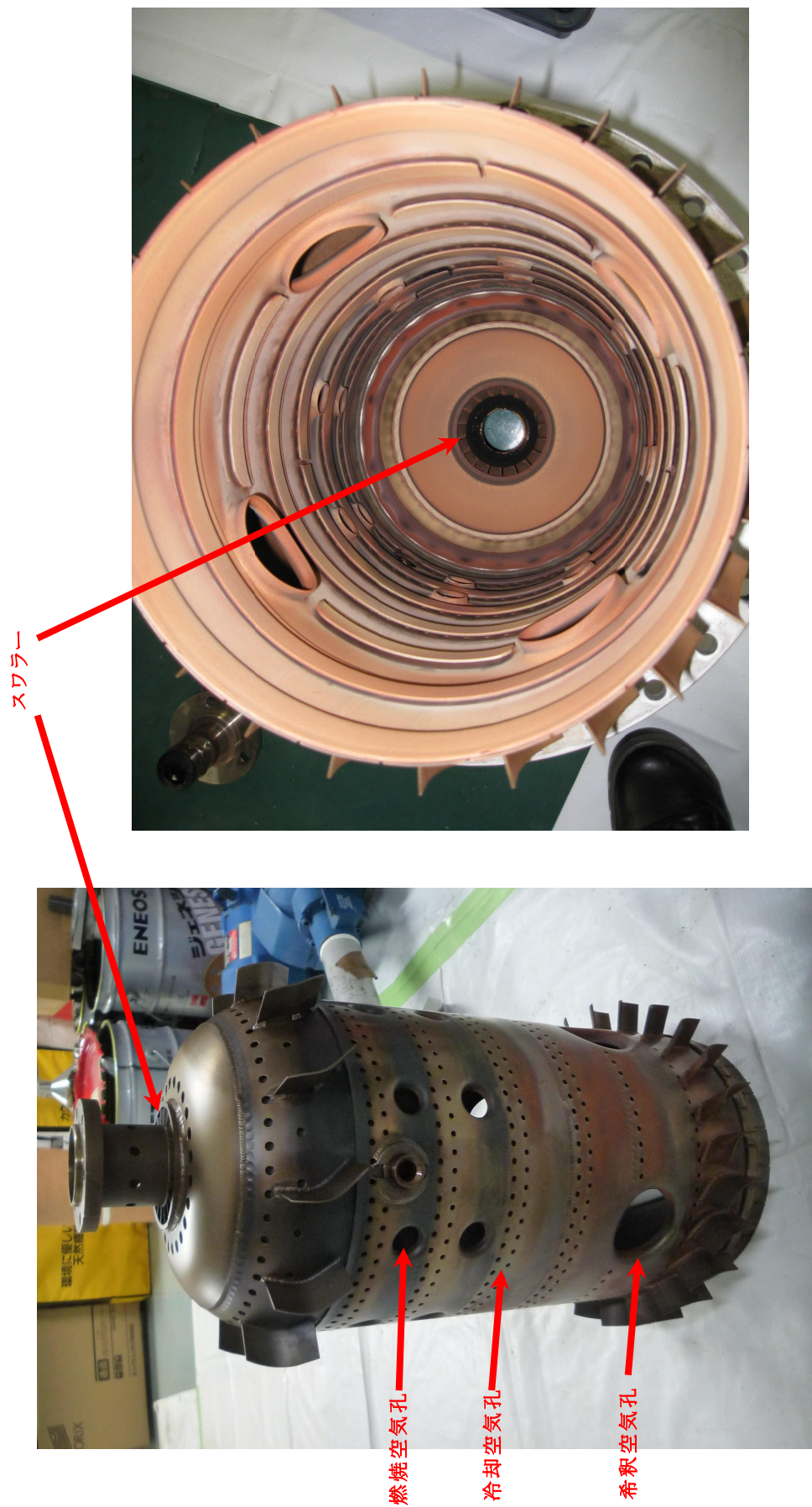


図 6.1 燃焼器ライナーの外観

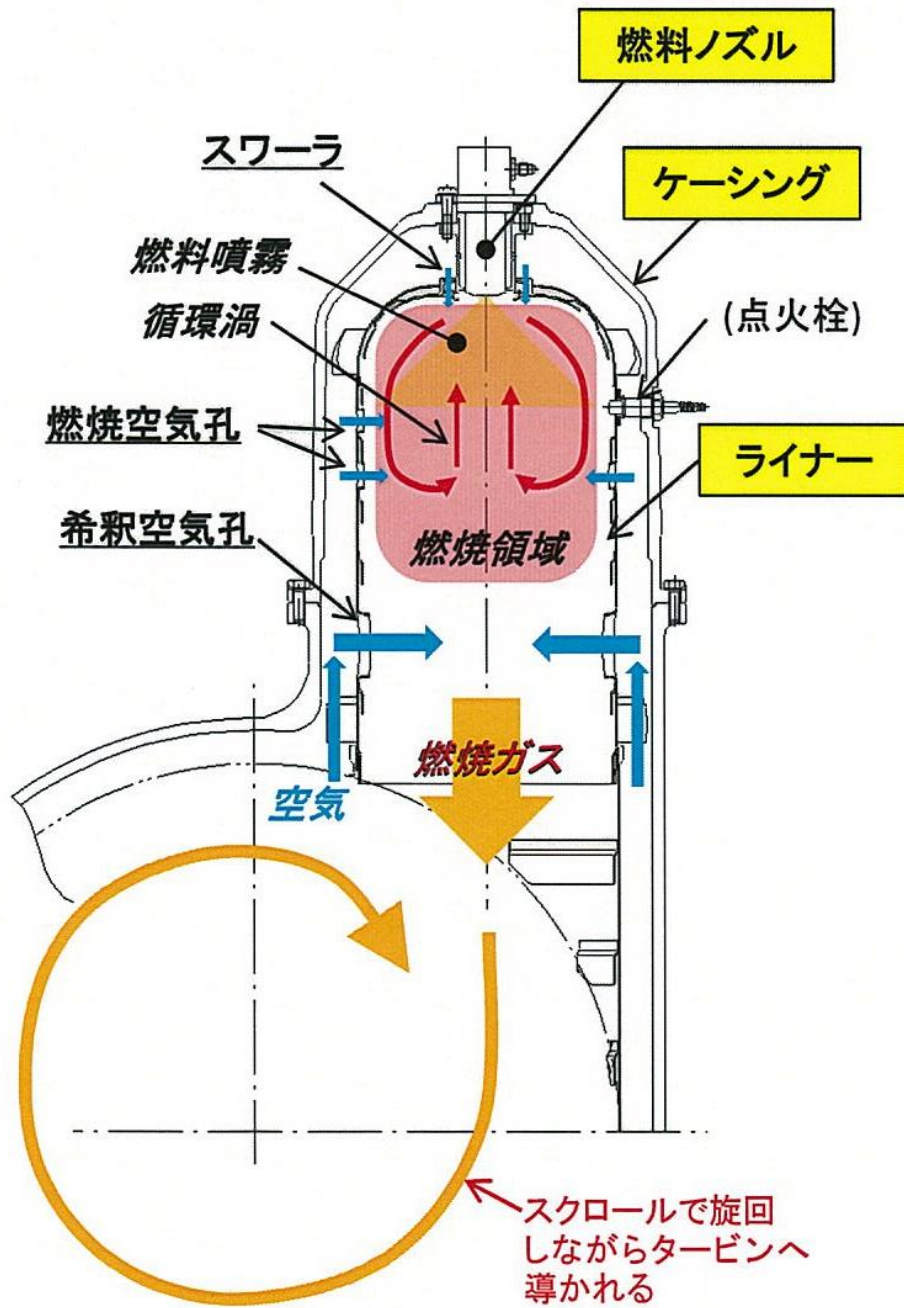


図 6.2 燃焼器ライナー内の燃焼ガスの流れ

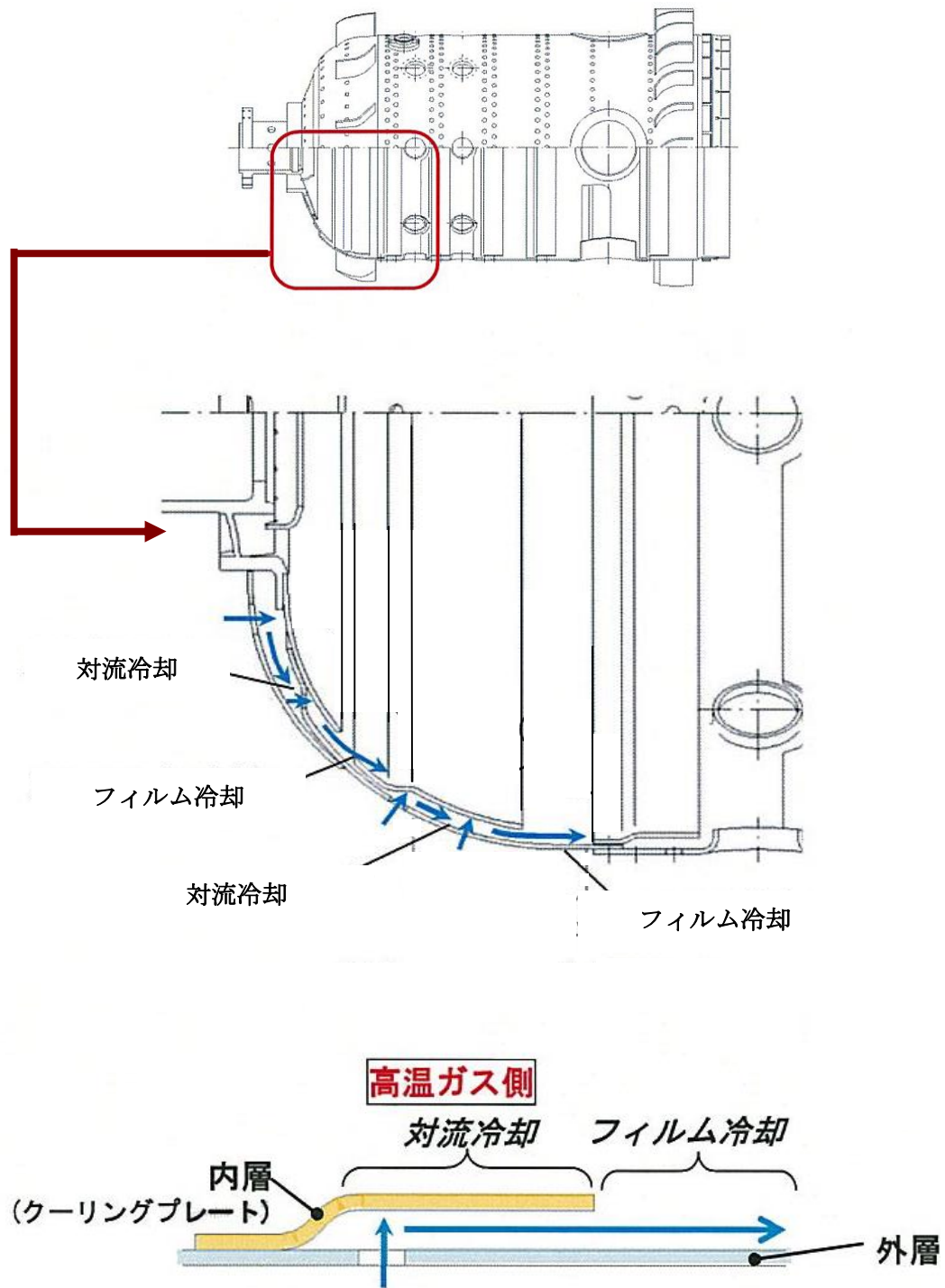
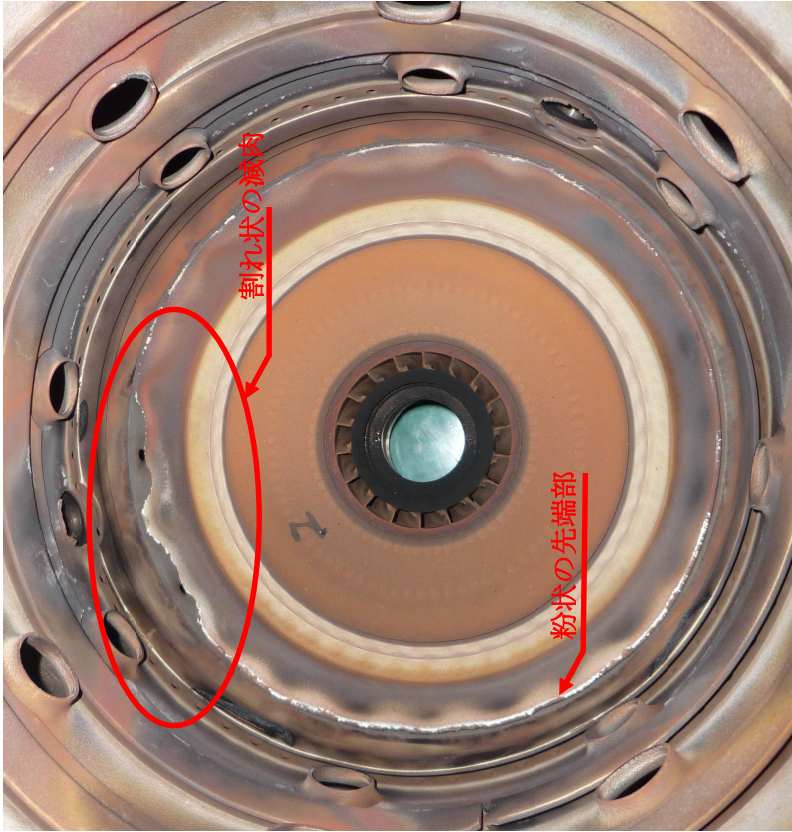


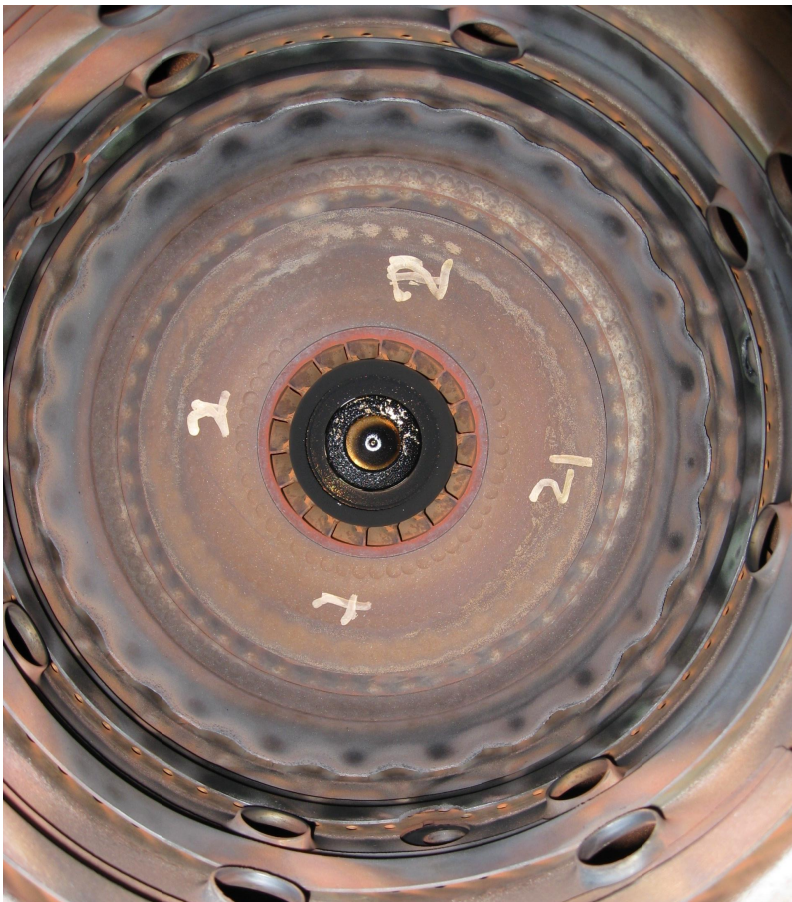
図 6.3 クーリングプレートの構造及び冷却



図 6.4 燃焼器ライナーの減肉



東日本大震災後に確認した燃焼器ライナーの様子
(交換後約 150 時間運転)

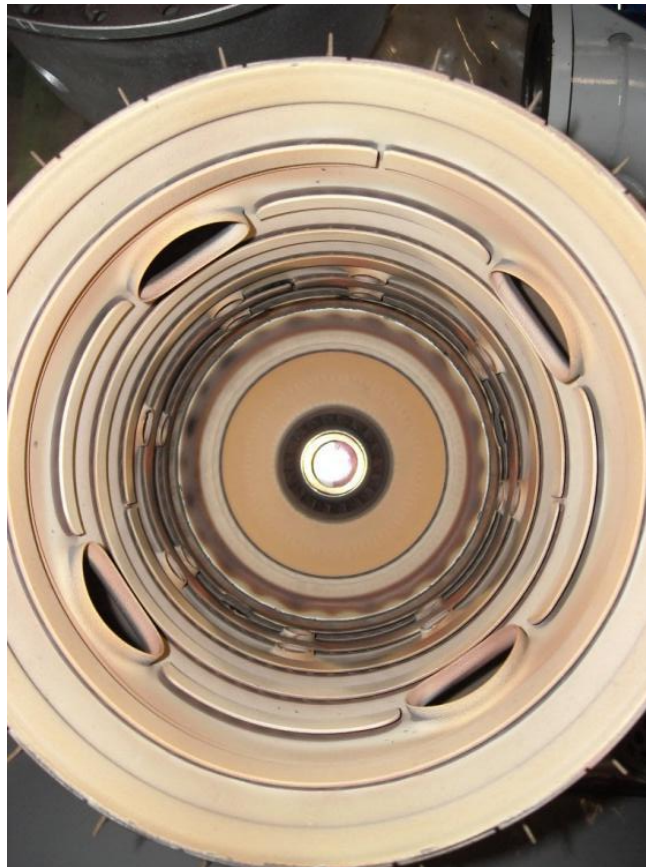


約 1500 時間の運転時間が経過した燃焼器ライナーの様子

図 6.5 減肉の様子に係る差異



No.1 エンジン

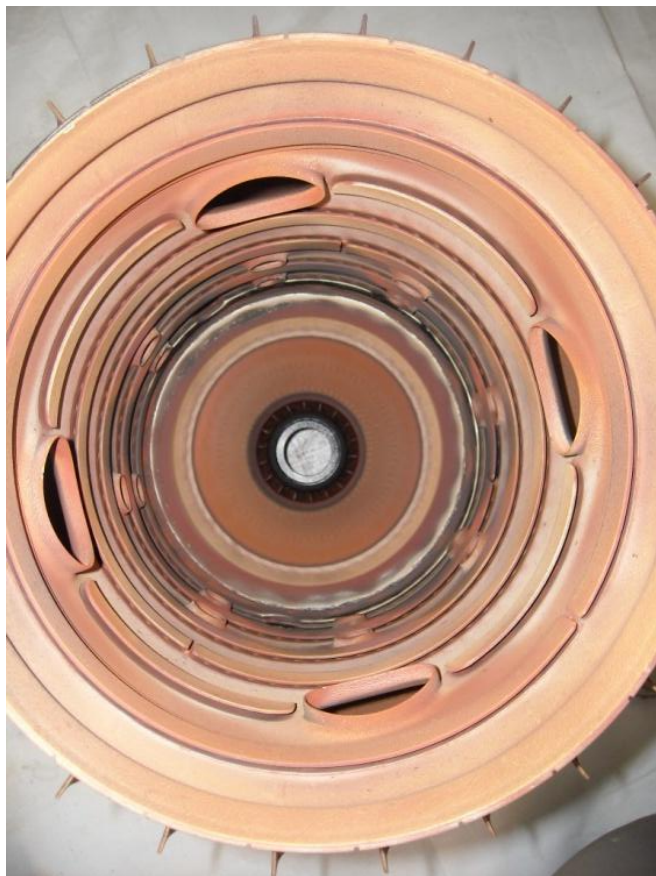


No.2 エンジン

図 6. 6. 1 東日本大震災前に確認した燃焼器ライナー内壁の様子 (A 号機)



No.1 エンジン



No.2 エンジン

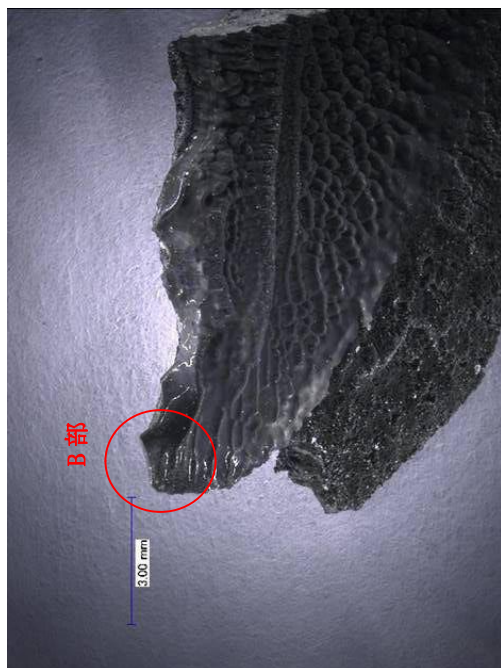
図 6.6.2 東日本大震災前に確認した燃焼器ライナー内壁の様子 (B 号機)



図 6.7 燃料噴射孔周辺に係る煤状の堆積物



図 6.8 燃料フィルターが目詰まり



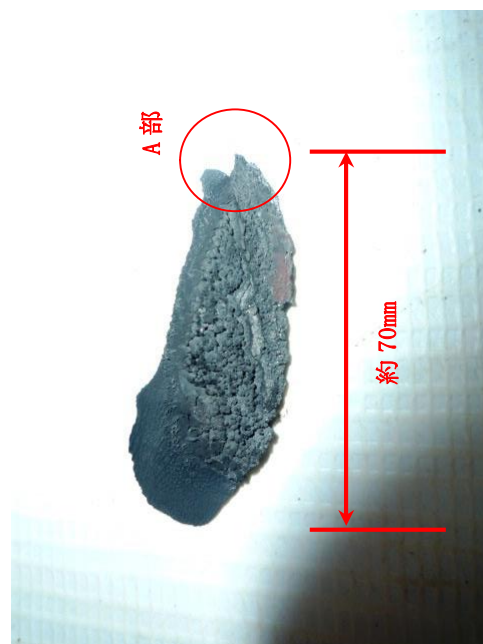
A 部拡大写真



B 部拡大写真



採取元



採取した固形物

図 6.9 燃焼器ライナー内壁から採取した付着物

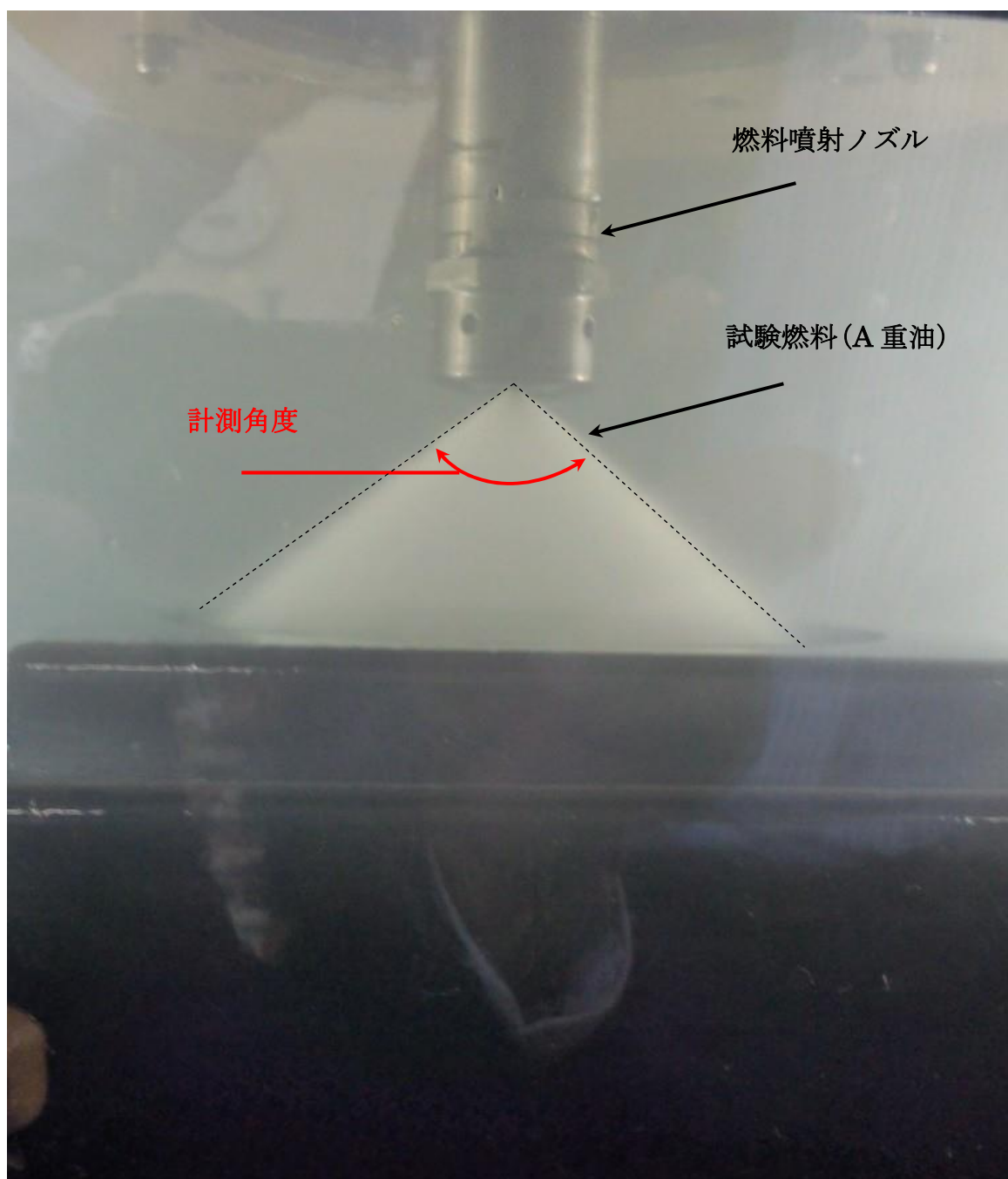


図 6.10 噴霧試験の様子

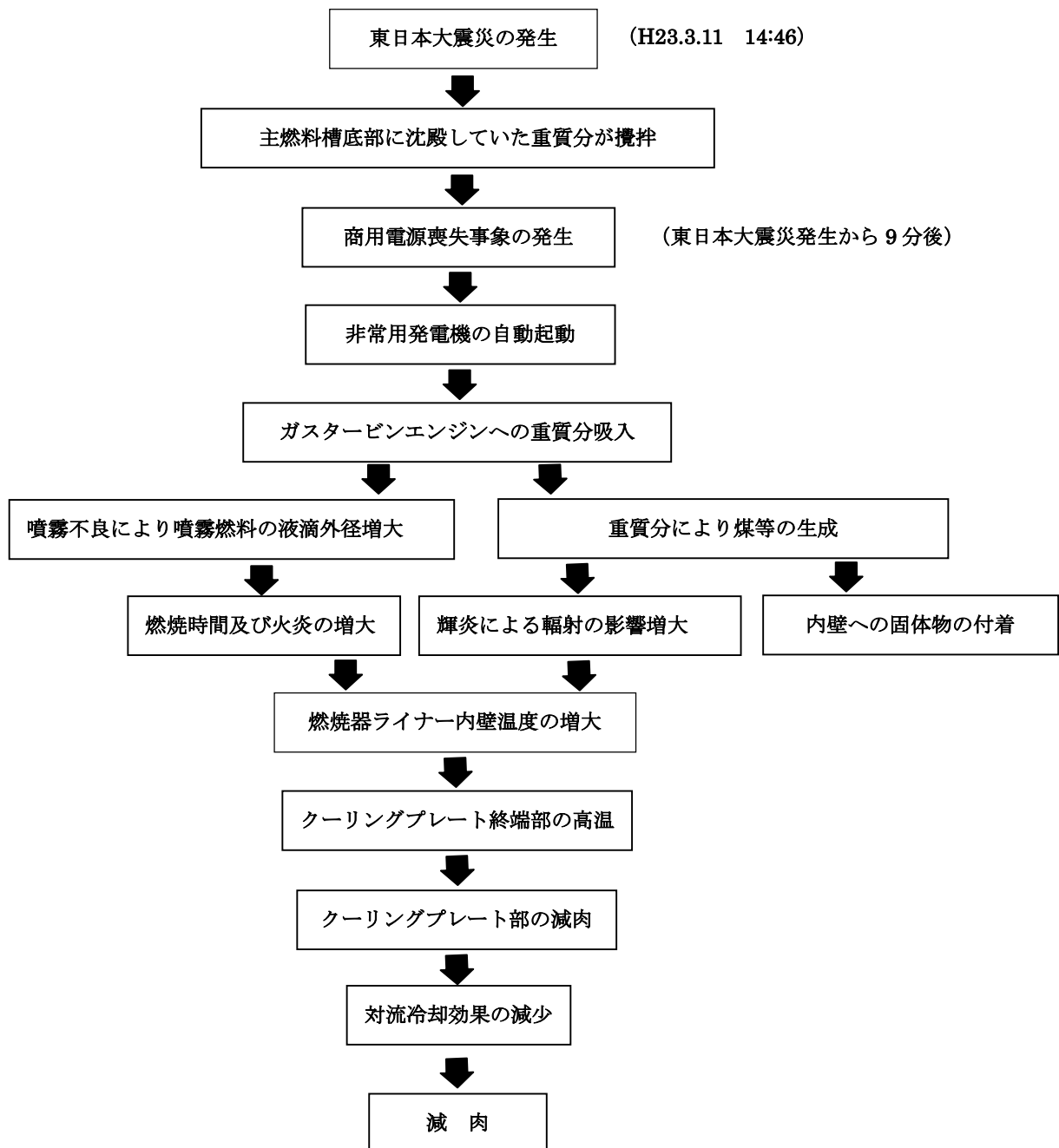
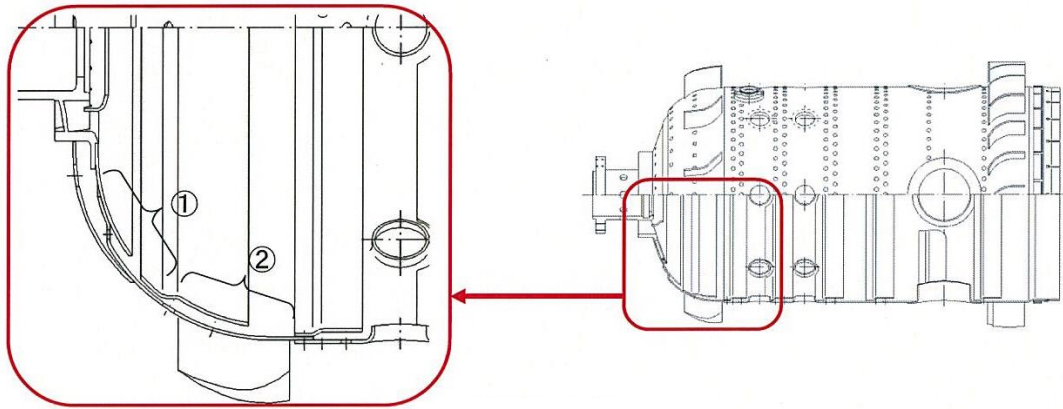


図 6.11 減肉のメカニズム

(1) 非常用型燃焼器ライナー (クーリングプレート : 2 段)



(2) 常用型燃焼器ライナー (クーリングプレート : 3 段)

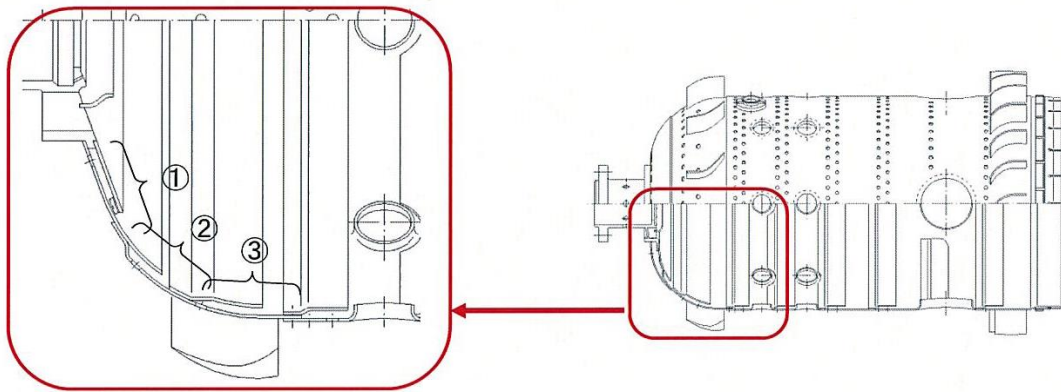


図 6.12 非常用及び常用型ライナーとの冷却構造上の差異

7. 結 言

今般、東日本大震災による強い揺れ及び長時間の商用電源喪失を経験したが、非常用発電機の電圧確立時間、発電性能、ガスタービンエンジンの運転諸元は健全であり、基礎部を含む機器全体についても破損及び変形等の異常も確認されず、最も優先されるべき非常用負荷への安定的な電源供給能力は確保されていたことが確認できた。

震災後の詳細点検においては、燃焼器ライナーの減肉を確認したが、震災の揺れにより攪拌したスラッジによる燃料の燃焼不良によることが原因であるとの結論に至った。減肉を確認した燃焼器ライナーは、クーリングプレートの残存量、母材の健全性、減肉の進行予測等から、交換の緊急性は低いとの結論に至ったが、燃焼器ライナーの信頼性をより向上させる目的で、耐熱性能を向上させる燃焼器ライナーに仕様を変更することを決定した。

スラッジの吸入による燃焼不良で、燃焼器ライナーの減肉を確認した経験はこれまでになく、東日本大震災の被災により得られた新たな知見である。東日本大震災において、主燃料槽内の強い揺れによるスラッジの攪拌並びにガスタービンエンジンへの吸入で燃焼器ライナーを減肉させたこと、更に商用電源喪失に伴う長時間の連続運転による熱負荷で減肉を加速させるという知見が得られていることを踏まえれば、燃焼器ライナーの耐熱性能を向上させたことは、更なる大地震及びそれに伴う長時間の商用電源喪失事象に対する非常用発電機ガスタービンエンジンの信頼性向上の一助につながる対策であると同時に、原子力事業者のみならず、一般産業界で使用している非常用ガスタービン発電機の信頼性向上に還元できるものでもある。

今後の保全活動においても、他施設及び他産業における保守経験の調査等を積極的に行い、より実効的かつ効率的な状態基準保全に資することを目的とした知見の蓄積に留意していく所存である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、伊与久達夫 高温工学試験研究炉部長、水島俊彦 同部次長、に御指導、助言を頂いたことに深く感謝の意を表します。また、未曾有の東日本大震災に被災したガスタービンエンジンについて、迅速かつ的確に状態観察を実施し、助言を頂いたカワサキマシンスYSTEMズ(株)並びに川崎重工業(株)の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所：“日本原子力研究所大洗研究所設置変更許可申請書（完本）〔別冊 3 H T T R〕”（2001）.
- (2) 斉藤伸三 他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”，日本原子力学会誌，32，p. 847(1990).
- (3) 藤川正剛 他：“H T T R（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”，日本原子力学会誌和文論文誌，1，p. 361(2002).
- (4) 中川繁昭 他：JAERI-Tech 2002-069，“高温工学試験研究炉の出力上昇試験－試験経過及び結果の概要－”（2002）.
- (5) 坂場成昭 他：JAERI-Tech 2003-043，“H T T R 高温試験運転の出力上昇試験計画”（2003）.
- (6) 高松邦吉 他：JAERI-Tech 2004-063，“高温工学試験研究炉の出力上昇試験（高温試験運転）－試験方法及び結果の概要－”（2004）.
- (7) S. Fujikawa et al., “Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in H T T R”, J. Nucl. Sci. Technol., 41, 12, pp.1245-1254 (2004).
- (8) 栃尾大輔 他：JAEA-Technology 2010-038，“HTTR 長期連続運転の結果の概要－高温・並列 50 日運転－”（2010）.
- (9) 猪井宏幸 他：JAEA-Technology 2009-048，“H T T R 非常用発電機の保守管理とガスタービンエンジンの分解点検”（2009）.

This is a blank page.

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 基本単位	
	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	キログラム毎立法メートル	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
セルシウス度 ^(e)	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.2002,20,705) 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
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	ヨ	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=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=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	
デジベール	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	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 ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(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 = 200 mg = 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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

