

調査研究委員会 報告書

—東日本大震災におけるガスタービン設備の
信頼性の調査研究結果—

2012年6月

公益社団法人日本ガスタービン学会

TEL 03-3665-0095

FAX 03-3365-0387

<http://www.gtsj.org/>

目次

調査研究委員会の概要

報告

1. まえがき	1
2. 東日本大震災の概要	
(1) 地震の概要	2
(2) 津波の概要	3
(3) 電力の被害状況	4
3. 調査研究結果	
(1) ガスタービンの設置状況	5
(2) アンケート調査結果	6
(3) 常用発電設備	7
(4) 非常用発電設備	9
(5) その他（移動型電源車、ポンプ等）	12
4. ガスタービン学会会員の経験	
(1) IHI 相馬工場	13
(2) 日立製作所	15
(3) 東北大学	18
5. 今後に備えた提言	21

調査研究委員会の概要

1. 活動期間

2011年8月～2012年6月

2. 委員構成

濱	純	(一般財団法人省エネルギーセンター)	委員長
壹岐	典彦	(独立行政法人産業技術総合研究所)	幹事
岸部	忠晴	(株式会社日立製作所)	
小森	豊明	(三菱重工業株式会社)	
辻田	星歩	(法政大学)	
永井	勝史	(川崎重工業株式会社)	
満岡	次郎	(株式会社 IHI)	
山本	悟	(東北大学)	

3. 活動経緯

2011年3月11日午後に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北から関東までの太平洋沿岸部を中心に、広域にわたり甚大な被害を受けた。この東日本大震災に対して、日本ガスタービン学会(GTSJ)は調査研究委員会を設置し、ガスタービン関連施設の被害状況、復旧状況などについて調査し、今後の震災に備えた課題と改善提言を行う活動を行った。

2011年7月にガスタービン定期講演会の特別セッションにおいて調査研究委員会の設置計画が紹介され、「東日本大震災とGTSJの果たすべき役割について」の講演が行われた。8月の理事会にて委員会の設置が承認された。

2011年9月から2012年5月まで計5回の委員会を開催した。阪神淡路大震災の際の臨時調査委員会(吉識委員長)の活動を参考としながら、東日本大震災の特徴を踏まえて調査内容、調査方法などを検討した結果、ガスタービンメーカー等各13社の協力を頂いて、アンケート調査等を行うとともに、会員の貴重な経験も報告書に掲載することとした。

アンケートをはじめ各種のデータや資料提供、データ集計・分析など様々な方々のご協力、ご支援を受けて報告書を6月に取り纏めた。

報告書を発行するに当たり、本委員会の活動にご協力を賜った関係各位に謝意を表す。

報 告

1. まえがき

2011年3月11日午後に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北から関東までの太平洋沿岸部を中心に、広域にわたり甚大な被害を受けました（東日本大震災と呼ばれる）。その復興に向けて、国、地域、市民活動まで様々な取り組みが継続的に進められている。一方で特に今回津波による原子力発電所の被災に伴い、電力需給は非常に厳しい状況が続いており、太陽光、風力等の再生可能エネルギーの活用、コンバインドサイクルなどのガスタービン活用の火力発電設備を導入して、電力供給を補うことが進められている一方で、夏季におけるピークシフトなどを含む節電、省エネなどの取り組みが供給側、需要側一体となって実施されていく必要に迫られている。

このような状況の中で、日本ガスタービン学会では、東日本大震災におけるガスタービン関連調査研究委員会を設置し、東日本大震災におけるガスタービン関連施設の被害状況、復旧状況などについて調査し、今後の震災に備えた課題を抽出し改善提言を行った。

具体的には、下記の項目について、アンケート調査によりガスタービン等のメーカー各社の協力を頂きながら、取り纏めを進めてきた。

- 1) 東日本大震災におけるガスタービン発電施設、生産設備等の被災状況、震災後の稼働状況、ならびに復旧状況の全体概要を明らかにする。
- 2) 震災後の非常用設備としてのガスタービンの稼働状況を明らかにする。
- 3) ガスタービン関連施設等における震災に対する課題抽出と提言を行う。

本報告は、メーカー各社から提供頂いたデータや資料、ならびに公表されている資料等を基に、ガスタービン設備の信頼性の調査結果とともに、本会員である大学、企業における具体的被災とその後の対応についての具体的体験事例も取り纏めたものである。本報告が今後の学会活動の資料として活用頂ければ幸いである。

2. 東日本大震災の概要

(1) 地震の概要

東北地方太平洋沖地震は、下記の通り、宮城県牡鹿半島沖を震源とする、観測史上最大のマグニチュード9.0の巨大地震であり、しかも、岩手県沖から茨城県沖まで南北約500km、東西約200kmに及ぶ広い震源域を有し、揺れの時間の長いことに特徴があった。

表1 地震の概要「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について」内閣府緊急災害対策本部、平成24年2月21日17時)

地震の震源及び規模等			
地震発生時刻	平成23年3月11日14時46分		
発生場所(震源位置)	北緯38度06.2分	東経142度51.6分	深さ24km
規模(マグニチュード)	9.0(モーメントマグニチュード)		
最大震度	7		

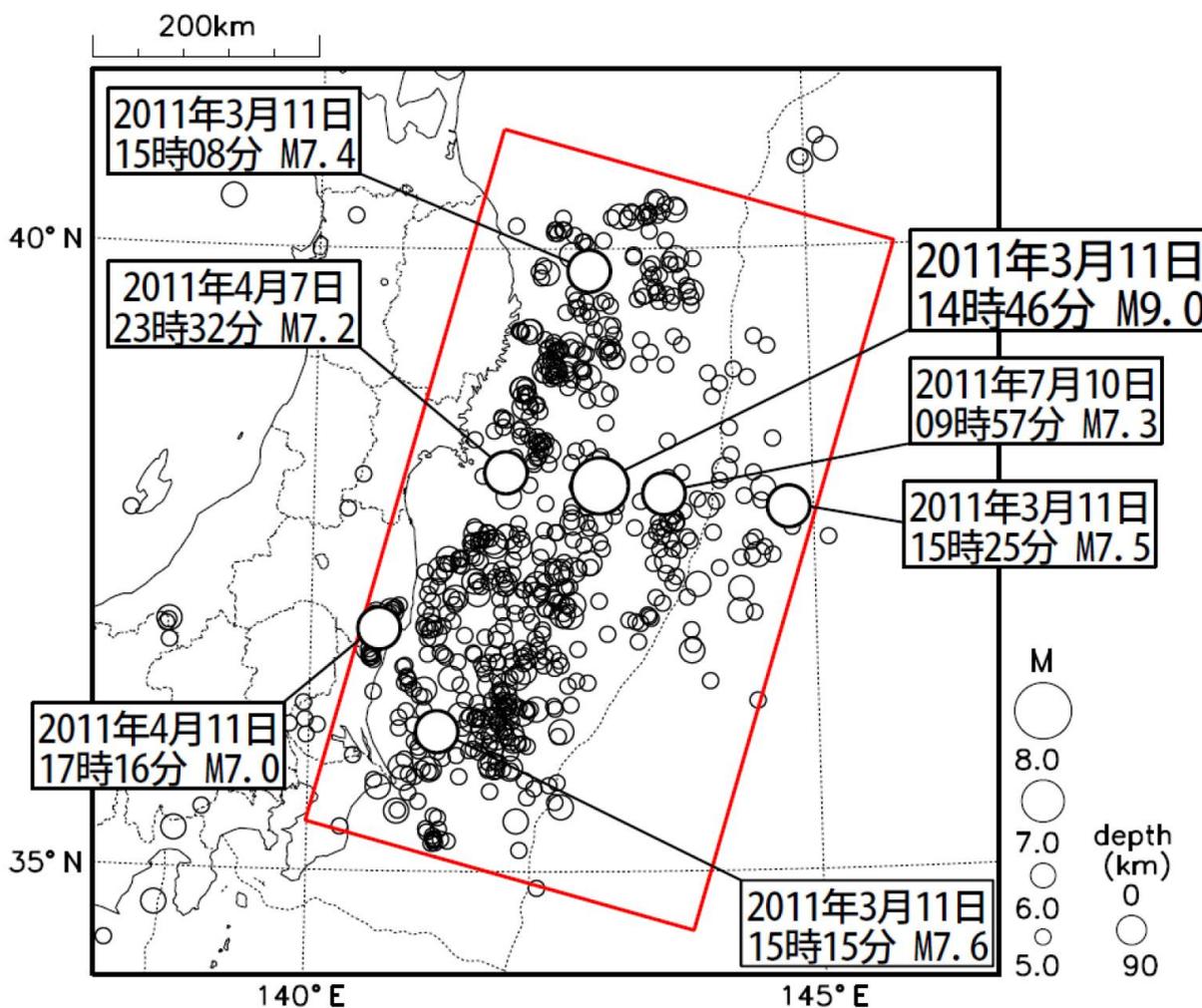


図1 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」(M9.0)の余震(出典:気象庁ホームページ)

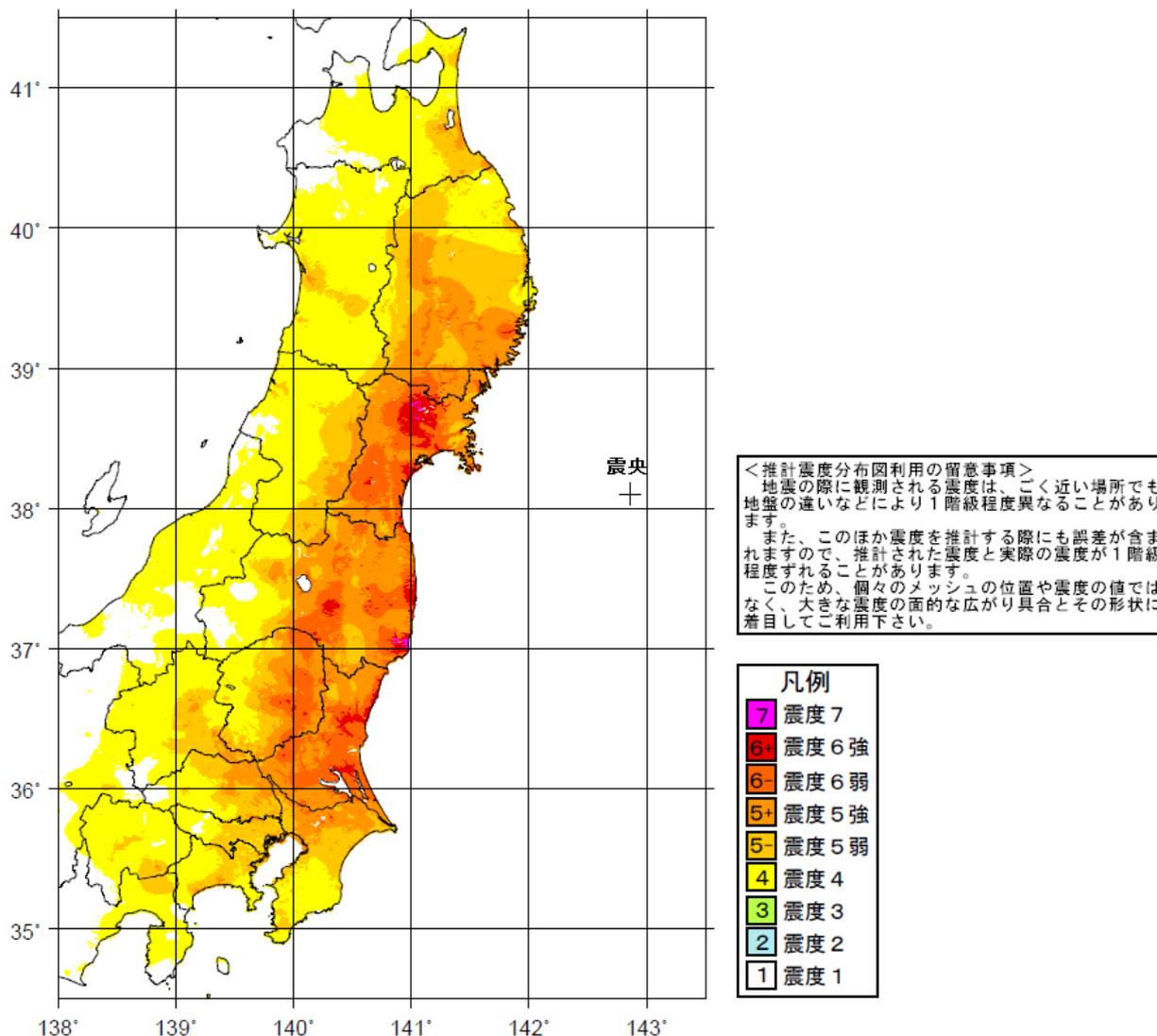


図2 推計震度分布図 (出典：気象庁ホームページ)

(2) 津波の規模

この東北地方太平洋沖地震により、図3のように大きな津波が引き起こされ、最大で海岸から6km内陸まで浸水、岩手県三陸南部、宮城県、福島県浜通り北部では津波の高さが沖合においても8mを超えている。海岸から内陸へ津波がかけ上がる高さ(遡上高)は津波の高さの何倍にもなることがある。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/ttjt/>) による速報値(2012年1月14日痕跡調査結果概要)によれば、東北地域を中心に、痕跡高が10mを超える地域が南北に約530kmに渡り、20mを超える地域も約200kmと非常に大きな痕跡高が広範囲に渡って記録されており、最高40.1mの観測最大の遡上高が大船渡市綾里湾で記録されている。

津波観測状況

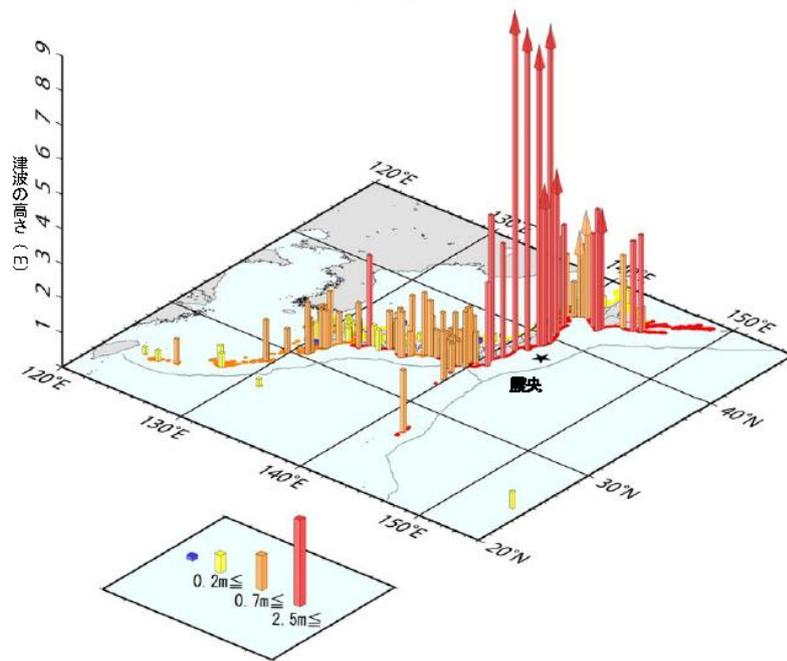


図3 津波の概要 (出典：気象庁ホームページ)

(3) 電力の被害状況

前述した地震やその後の余震ならびに津波による電力の被害状況は次表の通りである。

表2 東北地方太平洋沖地震の被害

	状況	備考
電力供給能力の変化	地震前後の発電状況 約 6,700 万 kW → 約 4,700 万 kW (2,000 万 kW の停電) 供給能力 停止中も含め、約 3,000 万 kW が再起不能	船津信之, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.63, No.3, p.177, 2012.3
停電の復旧状況	電気(停電)(経済産業省 平成 23 年 7 月 16 日 12:00) ・東北電力管内:家屋流出地域などを除いて 6 月 18 日までに復旧済み。 なお、6 日 16 時現在、家主不在等で送電を保留している家屋(約 1 万戸)、津波による家屋等流出地域(約 7 万 8 千戸)、福島県内の立入制限区域内(約 3 万 1 千戸)がある。 [参考情報]停止中の発電所(東北電力管内) 東北電力(株)女川原子力発電所 1、2、3号機 仙台火力発電所 4号機 新仙台火力発電所 1、2号機 原町火力発電所 1、2号機 ・東京電力管内(延べ停電戸数約 405 万戸)、北海道電力管内(同約 3 千戸)、中部電力管内(同約 4 百戸)の停電は復旧済み [参考情報]停止中の発電所(東京電力管内)(8 月 8 日 12:00) 東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~6号機 東京電力(株)福島第二原子力発電所 1~4号機 広野火力発電所 2、4号機 常陸那珂火力発電所 1号機	「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について」内閣府緊急災害対策本部, 平成 24 年 2 月 21 日 17 時)を基に作成

3. 調査研究結果

(1) ガスタービンの設置状況

我が国で生産されている陸用ガスタービンは、常用発電(ベースロード発電、ピークロード発電)および非常用発電などの用途として国内の各地域で広く使用されている。表3に1981年～2010年の30年間に国内で生産された陸用ガスタービンの中で、国内の各地域に納入された台数および出力の累計を示す。同表の区分は出力が0～735kW(1,000PS未満)の範囲を小型、736kW～22,064kW(1,000PS以上30,000PS

表3 1981年～2010年間の国内地域別納入台数および出力(kW)の累計

区分 Size 地域別 Location	小型 Small Unit (0～735kW)		中型 Medium Unit (736～22,064kW)		大型 Large Unit (22,065kW～)		全出力 Total	
	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
北海道 Hokkaido	253	87,669	106	207,022	7	52,000	366	346,691
東北 Tohoku	582	214,134	167	315,651	3	580,490	752	1,110,275
関東 Kantoh	2,266	740,503	1,872	4,259,258	65	7,208,668	4,203	12,208,429
中部 Chuubu	1,281	420,773	599	1,483,824	43	6,797,879	1,923	8,702,476
近畿 Kinki	839	307,449	739	1,748,905	23	3,281,248	1,601	5,337,602
中国 Chuugoku	331	117,489	142	378,395	17	1,621,121	490	2,117,005
四国 Shikoku	217	70,790	78	138,441	2	214,120	297	423,351
九州 Kyuushuu	550	203,032	236	439,167	16	1,369,730	802	2,011,929
沖縄(1984～) Okinawa	41	15,676	54	107,316	2	206,000	97	328,992
合計 Total	6,360	2,177,515	3,993	9,077,979	178	21,331,256	10,531	32,586,750

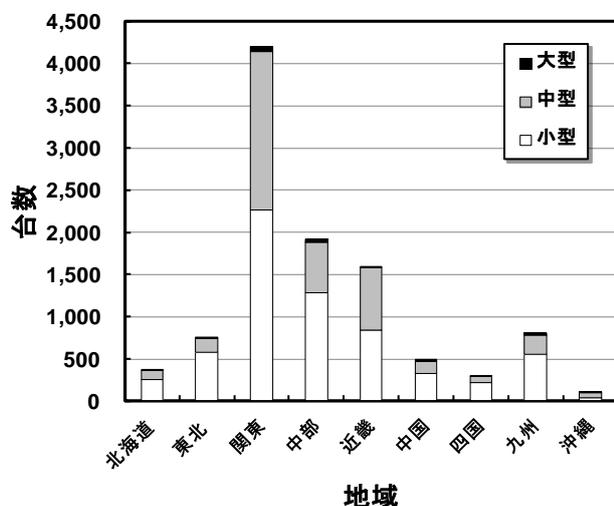


図4 30年間の地域別納入台数

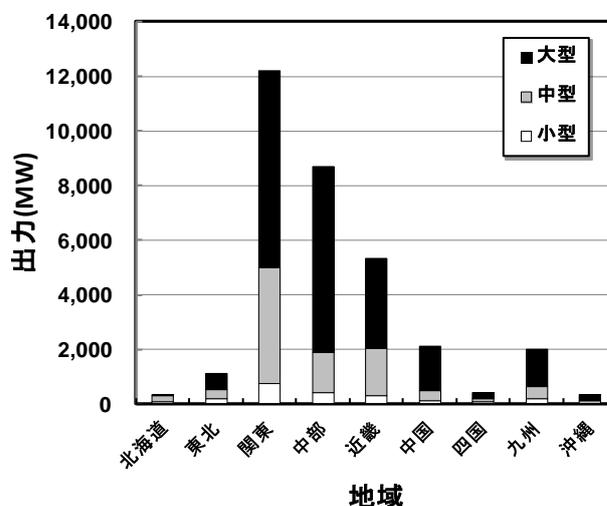


図5 30年間の地域別納入出力

未満)を中型および 22,065kW 以上(30,000PS 以上)を大型としてある。沖縄地域については 1984 年からの累計データである。また、表 3 の納入台数と出力の数値データをそれぞれグラフ化したものを図 4 と図 5 に示す。以上の累計データは日本ガスタービン学会誌に毎年掲載されている「ガスタービン及び過給機生産統計」の中の納入地域別生産台数および出力の統計データを過去 30 年間に亘って集計したものである。また、「ガスタービン及び過給機生産統計」は同学会のガスタービン統計作成委員会が、毎年国内の関連企業から提供頂いた生産統計データを纏めたものである。

全体的に台数では中小型が占める割合が高いが(図 4)、出力については大型が高くなっている(図 5)。地域別で比較すると、東日本大震災の被災地域を含んでいる関東が、納入台数および出力ともに 1 位であり、全体に占める割合は台数で 40%、出力では 37%である。一方、東日本大震災と津波による被害が甚大であった東北地域については、台数では 5 位、出力では 6 位となっている。また東北の全体に占める割合は台数では 7%、出力については 3%である。関東と東北の両地域を合わせた台数の合計は 4,955 台、出力の合計は 13,319MW であり、その中で東北の占める割合は台数で 15%、出力では 8%である。納入台数および出力ともに関東に次いで中部と近畿が高い割合を占めている。これら上位 3 地域の合計が全体に占める割合は台数で 73%、出力では 81%に達しており、太平洋側の人口比率の高い大都市を含む地域に陸用ガスタービンの大半が設置されていることが分かる。またこれらの地域は今後の大規模地震の発生が懸念されている関東・東海・東南海地域とも重なっている。

(2) アンケート調査結果

調査対象データは、停電も考慮し、以下の通りとした。主に

東北電力管内(青森県、岩手県、宮城県、福島県、秋田県、山形県、新潟県)

東京電力管内(茨城県、栃木県、千葉県、埼玉県、群馬県、東京都、神奈川県)

とし、ガスタービンメーカー各社から回答頂いたデータをもとに整理した。

ガスタービンメーカー各社よりご提供頂いた設備データの概要は下記の通りである。

表 4 調査対象データ

常用発電	201 台
非常用発電	3,980 台
ポンプ駆動用他	55 台
合計	4,236 台

表 5 ガスタービンの設置場所

	屋外・地上	屋内・屋上	地下	電源車,可動式	不明
常用	63 台	136 台	2 台	0 台	0 台
非常用(ポンプ駆動用を含む)	1,094 台	2,426 台	201 台	21 台	293 台
合計	1,157 台	2,562 台	203 台	21 台	293 台

表 6 燃料の種類

	ガス	液体燃料	多種燃料利用	不明
常用	122 台	16 台	63 台	
非常用(ポンプ駆動用を含む)	11 台	3,770 台	0 台	254 台

(3) 常用発電設備

① 調査対象データ

本調査結果は、東京電力および東北電力管内に設置された事業用および自家発用のガスタービン発電設備について、ガスタービンメーカーから提供頂いたデータ（201台）をもとにまとめたものである。常用発電設備の出力は、2MW未満が99台、2～20MWが43台、20MW以上が59台である。設置場所は、屋内が136台、屋外が63台、地下が2台である。燃料は、都市ガス等のガスが122台、A重油が9台、灯油が7台、副生ガス/LPG等の多種燃料利用が63台であり、多種燃料利用を含めガスを燃料として利用している割合が多い。

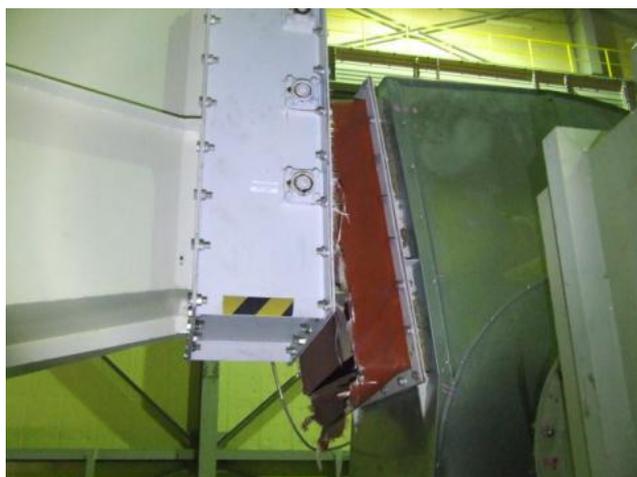
表7 常用発電設備の出力、燃料

出力	2MW未満	2MW以上 20MW未満	20MW以上
台数	99台	43台	59台

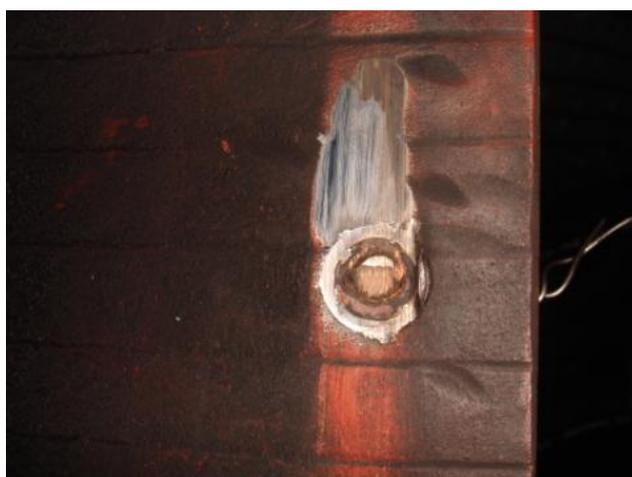
燃料	ガス	A重油	灯油	多種燃料
台数	122台	9台	7台	63台

② 被害状況と再稼働

震災後の被害状況は、以下のとおりである。屋外設置のガスタービンでエンクロージャ外部が高さ1m台まで海水が達した例では、エンクロージャ内部は防油堤に海水が溜まっていたもののガスタービン本体については浸水しなかった。また、ガスタービンベース基礎のシムプレートにずれが発生したり、ガスタービンと接続機器とのアライメントがずれたりした例もあるが、ガスタービン本体が損傷したというような報告はなかった。ただし、周辺機器や発電機が海水に浸かったり、制御盤が流されたりしたという報告や、地震による配管損傷、倒壊の報告もあった。



ファンの移動によるキャンバス継手の損傷



軸との接触によるガスタービンスピードセンサーの損傷

図6 常用ガスタービンの被害（資料提供：日立造船(株)）

地震発生時、運転中であったガスタービンは150台程度で、地震や津波で停止したガスタービンは40台程度であった。停止した要因は、停電検知（地震による広域停電）、系統周波数低下による回転数低下、保護装置作動、地震以外の保護（軸振動異常大、燃料ガス断）などであり、保護装置が正常に機能したようである。なお、ガスタービン本体が損傷したため停止したという報告はなかった。

停止したガスタービンの再運転は、早いものでは当日や翌日が16台、1週間後程度が9台で、停電復旧を待って稼働開始したガスタービンが多い。なお、再稼働が遅れた例では、設置しているプラントの電源復旧やインフラ設備（ガス供給ライン）、付帯設備（変圧器等）の復旧が遅れたり、客先工場自体が損傷等でフル稼働していないため自家発の発電量が必要になる時期が遅れたという報告がほとんどであった。

③ 耐震設計と保護装置

耐震設計は、各設置場所で規定されている地震係数によりアンカーを含む基礎および機器の構造設計を実施している例、防振装置を設置している例もある。保護装置は、過速度、排気温度高、油圧低など、ガスタービンに一般的な緊急停止装置が多く、地震感知器の装備がない例もある。今回の震災でガスタービン設備そのものに損傷はないため、耐震設計、保護装置については問題なく、追加の対策は不要と考えているという報告が多かったが、津波の被害を受ける可能性のある地域では周辺機器、制御盤を高い階に設置することにより、再稼働までの期間をさらに短縮できる可能性があると考えられる。

④ 顧客動向とガスタービンユーザーの要望

電力会社の節電要請がしばらく続くことを考慮し、自家発（コージェネレーション）の導入を考える顧客が多くなったという報告もあり、NOx 排出量と騒音・振動が低いガスタービンの導入が促進される可能性もある。

今回の震災を反映したガスタービンユーザーからの要望としては、系統連携専用ガスタービンに対しては自立運転対応、都市ガス専焼機に対しては他燃料での運転対応などがあり、さらに燃料インフラが絶たれた場合に廃燃料（ユーザー設備から排出される廃溶剤や副生ガス）での運転対応などの要望もあり、多種燃料に対応できるガスタービンの特性が生かされるものと思われる。

(4) 非常用発電設備

① 調査対象データ

今回の調査結果は、東京電力及び東北電力管内に設置された非常用発電装置（1都14県）について、ガスタービンメーカー及びユーザーから提供頂いたデータ（3980台）をもとにまとめたものである。主な業種別配備状況は、多い順に官庁関連、上下水道・ダム、事務所ビル、病院、IDC、通信、公共交通機関、金融・保険、放送等である。（図7）

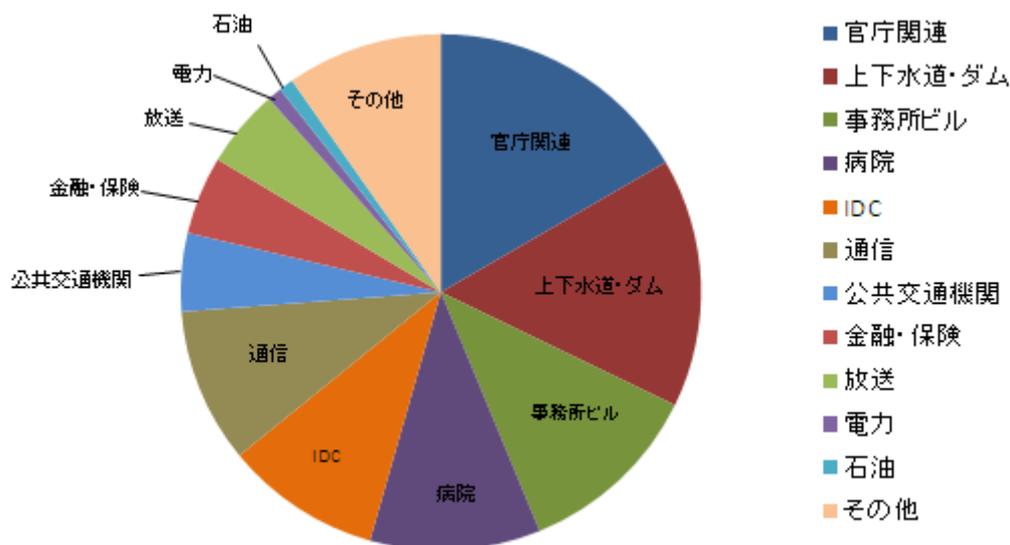


図7 東日本大震災地区における業種別配備状況

提供頂いたデータの内訳は、以下の通りである。

設備の出力は、1,000 kW 未満が 2,052 台、1,000 kW 以上が 1,143 台、不明が 785 台。

表8 非常用発電設備の出力、燃料

出力	1,000 kW 未満	1,000 kW 以上	不明
台数	2,052 台	1,143 台	785 台

燃料	A 重油	灯油	軽油	ガス	不明
台数	2,231 台	1,005 台	507 台	2 台	235 台

燃料は、A 重油が 2,231 台、灯油が 1,005 台、軽油が 507 台、ガスが 2 台、不明が 235 台であった。非常用発電設備の燃料はすべて液体燃料であり、また、阪神・淡路大震災時の調査では、A 重油が主体であったが、今回の調査結果では、寒冷地であるためか、灯油の割合が多くなっているようである。

② 稼働状況及び被害状況

提供頂いた非常用発電設備データの中から、運用状況が確認された設備の台数及び稼働状況をまとめた結果を表9に示す。

表9 確認された設置台数と稼働状況

調査対象台数	3,980 台	
調査未実施台数	807 台	
確認された設置台数（全地域）	3,173 台	
停電無し（対象外物件）	2,078 台	
停電した地域（今回対象）	1,095 台	
震災・津波により損傷	8 台	
停電時自動起動すべき台数	1,087 台	100 %
停電有・稼働せず	3 台	0.3 %
停電有・稼働確認	1,084 台	99.7 %
（稼働後停止物件、燃料切れ等）	（83 台）	（7.7 %）

運用状況が確認された全地域の設備台数の内、停電した地域に設置された設備台数は、約 1/3 の 1,095 台であるが、8 台が震災・津波（宮城県）により損壊しており、自動始動すべきものは 1,087 台であった。その内、1,084 台（99.7%）が起動しており、ガスタービン非常用発電装置の信頼性はかなり高いものと言える。

しかし、自動始動したもののうち、7.7%に相当する 83 台が稼働後停止している。この原因としては、燃料切れ、燃料フィルタの詰まり及び運用・操作上の問題等による稼働後停止がほとんどであった。また、稼働しなかった 3 台は、不着火（1 台）、主回路ブレーカの投入忘れによるインターロック（1 台）及び定期整備が未実施による燃料制御装置の故障（1 台）が原因であった。

③ 耐震性について

一般にガスタービン発電装置は軽量で振動が少ないため防振対策も容易で損壊等の事故が起りにくいこと、また冷却水が不要なことなどから、地震に対して信頼性の高い装置と言われている。今回の地震でも、津波による影響を含めても発電装置の損壊は 8 台（0.7%）であり、現状の耐震設計で十分信頼性の高いものになっていると思われる。

尚、ガスタービンメーカーの耐震設計は、「建築設備耐震設計・施工指針」（日本建築センター発行）に準拠している場合が多い。損壊防止を図るため設備機器や配管類の損傷や移動・転倒による直接被害の防止を基本とし、主に機器や配管類の固定と各部に生じる変位を吸収することとしている。耐震クラスは上記資料の設計用標準震度より決められているが、機能停止が許されない用途や、復旧するための中枢施設となる官庁施設、病院などではその都度ユーザーとの打ち合わせにより決められている。

④ 保護装置

ガスタービン発電装置には、一般に主要な構成要素の異常を検知して運転を停止し、損傷の拡大を防ぐ目的で各種の保護装置が付けられている。非常用発電装置の場合、緊急停止装置が設けられており、その内容はメーカーにより異なるが、過速度、排気ガス温度上昇、潤滑油圧力低下、潤滑油温度上昇などである。阪神・淡路大震災時には、これらの保護装置が地震の影響で誤作動し、正常に始動できなかつた例があつたが、今回は、誤作動による未稼働はほとんどなかつた。

⑤ メンテナンス

今回の震災の対象地区である東北電力管内及び東京電力管内に配備されたA社製非常用ガスタービン発電設備においてメーカー推奨の定期整備実施状況をまとめたものを表10に示す。

表10 メーカー推奨の定期整備実施状況

項目	台数	割合
定期整備実施物件	1,215 台	40.9 %
定期整備未実施物件	1,756 台	59.1 %
調査物件数	2,971 台	100.0 %

定期整備（A社の保守点検整備基準の3年毎から18年毎点検整備）の実施物件数は1,215台で、調査対象の40.9%しか定期整備が実施されていなかった。

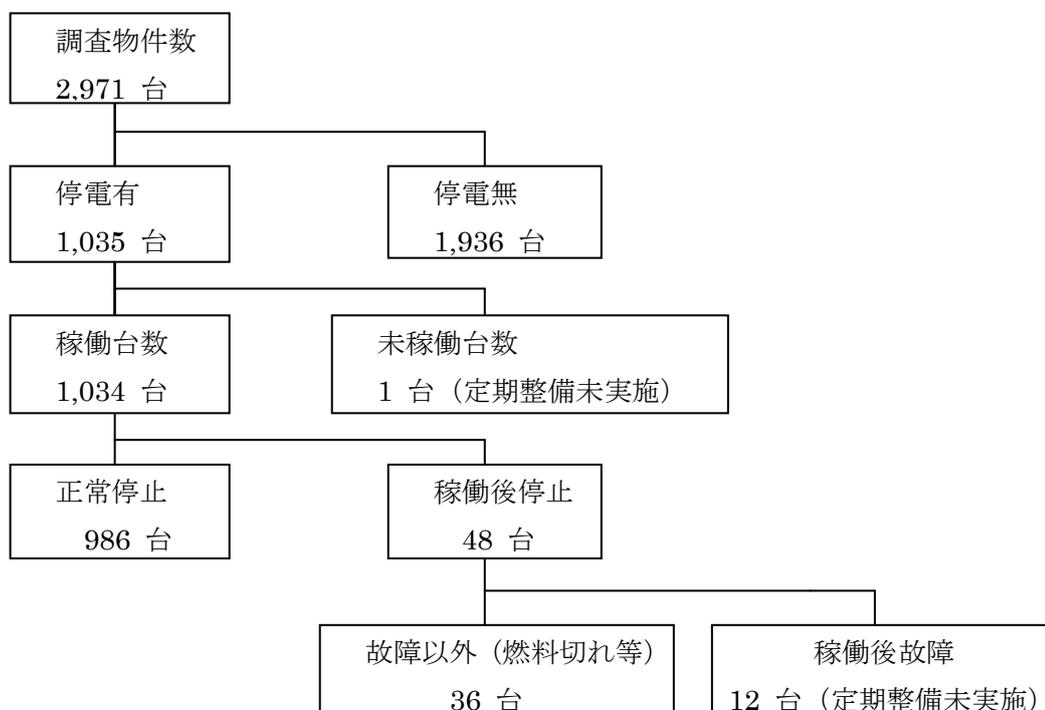


図8 A社製非常用発電設備の稼働状況

図8は、今回の震災におけるA社製非常用ガスタービン発電装置の稼働状況である。停電地域に

配備された総数 1,035 台のうち始動できなかつた台数は 1 台であったが、その原因は燃料制御装置の故障によるもので、定期整備が未実施であった。また、始動したものの稼働後に停止した 48 台の内、故障以外で停止した 36 台の原因は、燃料切れ、過負荷、運用・操作上の問題であったが、故障で停止した 12 台（全体の 1.2%）の発電設備は、全てメーカー推奨の定期整備を行っていなかったことが判明している。

これは他のガスタービンメーカーの非常用発電設備においても同様な傾向である。また、調査結果によれば、官庁物件のほとんどは定期的なメンテナンスを実施しているが、民間物件では行っていないユーザーが多かったと報告されている。

⑥ 今後の課題

今回の震災では、停電時の自動始動率は、阪神・淡路大震災時の 92.8%から 99.7%に、自動始動後に停止した割合は、約 20%から 7%程度に改善されている。

阪神・淡路大震災後の調査結果では

- ・制御盤全体の耐震性の向上（電気部品の耐震性の向上）
- ・燃料タンク容量の検討（燃料切れ対策）
- ・配管系に対する耐震性の向上（潤滑油の冷却水配管等の破断防止）
- ・制御用、補機用バッテリーの充電回路の改善（バッテリーの放電防止）

などが課題として挙げられていたが、今回の震災では、電気部品及び配管系に対する耐震性やバッテリーの充電回路に起因する故障はほとんど見うけられず、燃料切れなどによる起動後に運転停止した例が多くみられた。

また、調査結果によれば、メーカー推奨の定期整備を実施することが、故障を防止する上で効果があることが示された。更に、今回の震災・停電においては、交通網、通信手段の麻痺や長時間の停電となったことから、燃料の調達や確保に対する要望も多数寄せられた。

以上の調査結果から、非常用発電設備の今後の課題としては

- ・用途に応じた燃料タンク容量の整備
- ・燃料フィルタや潤滑油系の定期点検
- ・メーカー推奨の定期整備の実施
- ・震災、停電時の燃料調達・供給方法の確保

が挙げられる。特に、機能停止が許されない用途や地域社会に生じた被害を早期に復旧するための中枢施設となる官庁施設、病院などでは、これらの課題への対応が重要であると思われる。

(5) その他（移動型電源車、ポンプ等）

今回の震災では、移動電源車は 6 台の実働が明らかで、10,000 時間以上(800~27,00kW)であった。なお北海道電力の電源車が、東北電力と東京電力に派遣されるなど、稼働に向け待機中のものが複数あったが、使用しなかつた例も報告されている。ポンプ駆動用では建屋が津波により水没した例が報告されている。

4. ガスタービン学会会員の経験

(1) IHI 相馬工場

IHI 相馬工場は相馬市中心部から北西に 7 KM、海から内陸へ 1 0 KM に位置し、今回の地震に伴う大津波は海岸から約 5 KM の国道 6 号バイパス線にまで到達したが、工場の敷地までは及ぶことがなかった。しかしながら、震度 6 の揺れは激烈で、インフラ（建屋、ガス、電気、水、排水処理など）すべてが何らかの被害を受け、また、事務所、自動倉庫なども倒壊、落下、損傷などが発生した。幸いに人的被害は皆無であったものの、多数の従業員がご家族、家屋に被害をこうむった。

① 安否確認から生活・情報インフラの確保へ

震災後からの 1 週間は「安否確認・生活確保フェーズ」として従業員の安否確認、原発への備え、救援物資およびその輸送手段の確保をはじめ、工場のライフラインの確認と復旧、全国から集まった救援物資の自治体への配布などが行われた。

ライフラインは地震発生と同時に多くの地域で遮断された。通信インフラ遮断時の安否確認システムへの備えの重要性が再認識されている。また、復旧計画の検討にネットワークが使えないため、初期には 20 人ほどが東京の事務所に移動して作業し、代替回線への切り替えられた 4 月上旬までの期間を凌いでいる。ネットワーク回線のバックアップの必要性がハイライトされている。

② サブ変台のリカバリー

事業継続面で最もダメージが大きかったのは変台の損傷であった。相馬工場では、東北電力から特別高圧 66,000V の電力を受電し、工場内の建屋それぞれにある計 17 台のサブ変台で変圧をしていたが、7 台が損傷を受けた。いずれも建屋の 2 階に設置されたもので、大きな揺れにさらされたものであった。

③ 操業再開へ

精密部品を作る工作機械が地震などで動いてしまい、「診断・調整・レベルだし」と精度の再調整が必要となったが、大部分の機械の調整は余震が続く中で工場の現場の職長や班長により実施された。従来から需要変動に柔軟に対応するために、自分たちで機械を動かしてレイアウト変更を繰り返していた経験が活かされ、早期の復旧実現の決め手となった。



図 9 機械の調整作業の様子



図 10 表面処理槽の状態

④ 5月半ばに操業を全面再開へ

全面再開に向けた取り組みは続けられた。地震の揺れにより表面処理設備も被害を受け、液漏れが多数発生した。設計どおりに防液堤を超えることはなかったものの、従業員の立ち入りができず、専門業者による調査と廃液回収の処理完了を待たざるを得なかった。大型の自動倉庫設備でも素材や治工具が落下・損傷しクレーンも走行不能となり、人手による手当てが続けられた。

こうした課題を一つずつ乗り越えることで、4月上旬から順次操業を拡大し4月18日には仮設のサブ変台もすべて敷設され、5月13日には操業の全面再開に至った。

サプライチェーン集中に当たっては、生産効率面のメリットとともに、非常時に備えたリスク対応への認識も必要である。一方で、非常時にあっても適用可能な自己復旧力の効用も注目に値する。生産拠点デュアルソース化といったリスク対応投資の見定め等が、将来に向けた検討課題として浮かび上がる。



図1.1 復旧活動の様子



図1.2 復旧した相馬工場

(2) 日立製作所

① 地震発生当日

創業の地である日立事業所では、ガスタービン、蒸気タービンをはじめ大型発電機など、多くの電気機械品を生産している。地震が発生した時も、通常通り機器製作やメンテナンスが行なわれていた。地震はかつて経験したことがない震度6強の巨大なものであったが、最初の揺れが発生した時点で重機のオペレータや作業員は危険を察知し避難、他の職員もみなあらかじめ定められたマニュアルと定期的に行われている訓練通りに避難行動したため、死傷者を1人も出すことがなかった。また、日立事業所は海岸近くに位置するが、高台にあるため津波被害はなかった。

余震がある程度鎮静化してから、従業員の帰宅が開始されたが、唯一の鉄道路線である常磐線が不通となったため、急遽用意されたバスや徒歩や自家用車での帰宅となった。また、日立事業所に宿泊したものも少なくなかった。日立事業所内の電源は地震により喪失し外部の情報を得ることができなくなっていたが、東京本社では当日のうちに緊急対策本部が設置され、日立事業所への自家発の手配、被災した太平洋岸の発電所支援や技術者の派遣準備などが迅速に進められた。



図13 災害対策統括本部全体会議



図14 発電機組み立て作業



図15 製作中のタービンロータ

(図13～15、出典：特集「震災からの復興（第三弾）被災状況報告」、火力原子力発電技術協会会誌 Vol.62 No.7 p1、2011.07)

② 被災状況と操業再開

強かつ長時間の揺れであったため、建屋、生産設備の被害に加え、電気・水道などのライフラインが停止した。また、大型機器を出荷する日立港の専用埠頭も大きなダメージを受けた。ただし、

日立事業所では、日頃からの転倒防止対策などが功を奏し、製作中の製品や点検・修理中の機器に大きな被害はなかった。

生産設備を点検した結果、主要工作機器 490 台の 6 割はすぐに使用可能な状態で、あとの 3 割も大きな問題はなかった。工作機械の多くは精度を要求されるので、慎重に精度確認と試運転を実施し、3 月 29 日には操業再開に漕ぎつけることができた。

事業所の操業が再開した一方で、日立港の専用埠頭は大きな損傷を受けており、復旧には相当の時間を要する状況であった。当面の対応として一般埠頭を借用し、輸送ルートの国道も一部通行不能であったため関係行政機関と調整し迂回ルートを確認した。4 月 3 日に大型機器の出荷を再開、出荷第 1 号は九州電力殿新大分発電所向けガスタービン用補機ベースで、4 月 14 日には東京電力殿鹿島火力発電所向け低圧タービンロータ 2 基の出荷を行なった。



H-80 ガスタービン用補機



蒸気タービン低圧ロータ

図 1 6 茨城港日立港区の船積み作業（出典：特集「震災からの復興（第三弾）被災状況報告」、火力原子力発電技術協会会誌 Vol.62 No.7 p1、2011.07、資料提供：(株)日立製作所「日立新聞」2011 年 4・5 合併号第 1006 号）

③ 復興支援

想定された夏場の電力不足への対応のため、通常の受注設備の生産に加え、緊急電源対応として H-25 型ガスタービンの製作や、被災電源設備の復旧など、協力企業と一体となった取り組みを行なった。

東京電力殿広野火力発電所から海水に浸かった BFP タービンや電動機が持ち込まれ、分解点検と修理が行なわれた。海水に浸かったため再使用不可能とされていたが、作り直すのでは夏までに復旧できない。長時間海水に浸かった電動機の復旧は未経験で初めての取り組みであったが、まずメガチェックを行ない、抵抗値がほとんどない機器については水槽に入れ海水を抜き、その後にスチーム洗浄、乾燥の工程を繰り返すことで再使用可能まで回復することができた。また、海水に浸かった BFP タービン翼は、応急措置として除塩清掃して再使用可能にまで復旧した。



図17 発電所より持ち込まれた装置の分解点検と修理 (出典：特集「震災からの復興(第三弾)被災状況報告」、火力原子力発電技術協会会誌 Vol.62 No.7 p1、2011.07)

(3) 東北大学

地震のあった3月11日は、共同研究の打ち合わせや大学院生のインターンシップの報告会などが予定されていた日で、民間企業の方々も青葉山キャンパス内に滞在していた。会議や研修などで使用する青葉記念会館の4階で、研究室の大学院生がインターンシップでの成果をまさにこれから報告しようとする直前に地震は起きた。これまで鳴ったことがなかった携帯電話の地震警報が突然鳴り出し、最初は何事かわからずにとりまわるところ突然大きな揺れが発生し、宮城県沖地震がついに来たと直感した。立っていることはできず机ははげしく移動し始め、会議室のブラインドや天井の照明が大きく揺れ出し、いまにも落ちてきそうなので天井を気にしながらしゃがみこんでいた。大きな円を描くような揺れが数分続いた後、少し落ち着いてきたのでやっと終わったかと思ったその後、また大きな揺れが始まりそれが数分続いた。体感で4、5分続いた地震が終わった後は、ブラインドが崩れ落ち、机が散乱している状態で、会議出席者はただ茫然と立ちすくんでいたが、次第に正気にもどって皆建物外に避難し始めた。当然のことながら報告会は中止となった。私と大学院生も研究室のことが気になったので機械・知能系がある敷地まで急いで向かった。外は建物から避難してきた人々で混雑していたが、日頃から宮城県沖地震や火災を想定した避難訓練を実施していたこともあり、整然と避難していた。機械・知能系に到着した時にはすでに建物内にいた職員や学生は外に避難している状況で、避難指定場所へ移動し始めていた。幸い建物からの火災は発生しなかった。停電でしかも建物内には入れないため、地震の情報源は携帯電話だけであったが電話は全くと言っていいほどつながらない。そのような中で役に立ったのはワンセグ付の携帯電話であった。ワンセグで伝えられて来る情報はすべて驚愕するものであり、仙台は震度7とか、大津波警報発令で予想高さ6mとか、にわかには信じ難いものばかりであった。地震の当事者というのは情報源も乏しくその状況を十分に把握できない存在であることを痛感した。そのような中においても、避難訓練のマニュアルを作成して各職員の担当が明確に割り振られていたこともあり、建物内の被害状況や避難者の情報は担当者から刻々と集められた。次第に小雪は降り始めだんだん寒くなってきた中をどれくらい外に待機していたかよく把握できていないが、2時間程度過ぎたころ被害調査の結果が出そろい、建物内外に多くの亀裂が発生しているものの、柱自体は大丈夫であることが確認された。私の研究室が居住する建物は4階建のかなり古い鉄筋コンクリート造りの建物であるが、宮城県沖地震を想定して10年ほど前にすでに耐震補強工事を済ませていた。この工事をしていなかった場合には倒壊していたかもしれないらしい。建物内への一時的な立ち入りが許可されたので、研究室の被害状況を把握するため各部屋を見回ってみたところ、本棚や食器類が散乱した状態になっており(写真参照)、かつ天井に設置されているスチーム暖房器の配管が破損して水漏れを起こし、二部屋ほど水浸しの状態であった。本棚等は宮城県沖地震に備えて壁への固定が指導されていたため一部は倒れる被害はなかったが、部屋によっては固定器具も役に立たなかったようである。本当に幸いだったのは、大学も春休みに入っており研究室には学生がほとんどいなかったことであり、機械・知能系の死傷者はいない。建物自体が停電・断水の状態であり使用不能であったため、各担当責任者以外は当面自宅待機が命ぜられた。普段バスで通勤している私は、交通がマヒ状態であるので徒歩で帰路を急いだ。その途中、道路の至るところで段差ができ、また帰路を急ごうとする自動車の大渋滞が起きていた。自宅の公務員宿舎は幸いほとんど外見上の被害はなく、部屋の物は散

乱したものの家族は無事であった。ただ、電気・ガスは止まってしまった。唯一、水だけは使える状態にありトイレが使用できたのは幸いであった。ちなみに仙台市内ではライフラインがすべて止まってしばらく復旧しなかった地域もたくさんある。暗くなっても明かりがつけられないため、ろうそくに火をつけ、灯油があるのにファンヒーターが使えないため、厚着をして寒さをしのいだ。いずれ来る宮城県沖地震に備えて携帯用ガスコンロ、1週間程度の非常食などは常備していたため、食糧には困ることはなく避難所にお世話になることもなかった。しかしながら、ろうそくの火だけでは夜の行動は無理であることを悟り、明るい内に手持ちの食糧で食事を済ませて、暗くなったら床に入ることにした。身内の親族も心配なので携帯電話で何度か電話したがまったくつながらず。また、テレビが見られず地震の被害もよくわからない。しかたなくラジオと携帯のワンセグで情報を得ていたが、東北地方沿岸での津波の被害が徐々に伝わってくるにつれて、これまで想定していた宮城県沖地震とは比較にならないほどの大規模な地震と津波が起きたということを理解しはじめた。携帯のワンセグは予想以上にバッテリーを消費してしまい、充電分がその日のうちになくなってしまったため途方に暮れていたところ、息子が携帯用の乾電池バッテリーを所有していることがわかり、家中の単3電池を掻き集めて節約しつつワンセグを再生して情報を収集していた。そのような生活が数日（メモしていなかったため正確な日数がわからない）続いたが、ある日突如電気が復旧した。暖房器具も使えるようになった。この数日間の生活を通して電気の有難さを痛感した。ここに来て次に困ってきたのは、ガスが使えないためお風呂に入れないことであった。しかたなく、電気ポットでお湯を数回沸かしてバケツに入れ、それを水で薄めて体を洗った。結局ガスが復旧したのはほぼ1ヶ月後のことであり、この間バケツのお湯のみで体を洗うという普段では考えられない生活を強いられた（なんとかなるという気分にもなっていたが）。ガスが復旧した後に入ったお風呂の有難さも忘れられない。物流が遮断されているため、スーパーやコンビニは閉店しており避難所以外どこにも食糧がない状態がしばらく続いた。これに合わせて自動車用ガソリンが手に入らなくなり、移動の手段すら奪われはじめた。近所のスーパー（宮城生協）が全面再開したのは地震の2週間後くらいであり、開店当初は私も寒い中で2時間以上並んで食糧品を買いあさった。

東北大学ではライフラインが全滅という状況のなか、安否情報の確認と災害被害の情報などをホームページに掲載することで職員や学生への緊急連絡を地震直後から始めており、担当された職員の方々には頭が下がる思いである。工学部の職員も地震の5日後には召集された。学生が春休みに入っていたとはいえ、時期が年度末で卒業式の前、そして新入生や新学期への対応などで至急の対応が必要であったこともある。結局、卒業式は中止になり卒業証書は後日郵送されることになった。また新学期は5月上旬まで延期された。在校生は帰省するように指導され、また留学生には帰国を奨励した。その後まとめられた東北大学の被害は、まず帰省中の学生3名が津波による被災で死亡した（内1名は入学予定者）。ただし、その他の大学内外における人的被害報告は特になく、時期が春休みであった点や日ごろの防災への備えが功を奏した結果であるといえる。しかしながら、建物の被害は甚大で、「危険」判定の建物が28棟、「要注意判定」が48棟である。このうち、工学部のマテリアル・開発系、電気・応物系、人間・環境系、川内キャンパスの合同研究棟の4棟が立ち入り禁止になり現在もその状態が続いている。たとえば、電子・応物系建物では、屋上部分の柱・壁がともに崩壊してエレベーター2基が落下した。一方、機械・知能系では、大講義室の天井が落下、天井に設置したスチーム複数が落下、スチーム用配管破損で水漏れ多数、一部で地盤沈下（現

在も進行中)、そして建物内亀裂多数という被害であった。被害総額は、東北大学全体で約 800 億円、そのうち工学研究科で、建物 90 億円、物品 130 億円、またそのうち機械・知能系で 34 億円と見積もられた。実は 4 月 7 日には震度 6 強の最大余震があり、研究室の私の部屋では 3 月 11 日には倒れなかったガラス戸付の本棚がすべて倒れてガラスが散乱してしまった。

ほぼ 1 年が過ぎた現在、文部科学省をはじめ国内外の大学・組織そして個人からの支援も相まって、東北大学の復旧作業も順調に進んでいる。職員や学生も平常心を取り戻し、地震前の教育・研究活動がほぼできるようになった。しかしながら、約 1600 人の在校生が被災地域出身の学生であり、実家が被災した学生も多数いるが、その被害状況は必ずしも把握できていない。現に、進学や入学をあきらめるといふ事例も報告されている。東北大学受験者数も減少した。また、福島第一原子力発電所の事故も重なり、放射能を恐れて留学生の入学希望者は激減している。今後、しばらくこの傾向は続くものと覚悟している。ちなみに、現在の放射能レベルは $0.05\mu\text{Sv/h}$ (私の部屋で測定)でありまったく心配いらないレベルである。一方では、地震後には東北大学独自のボランティア団体 (<http://tohokugakuseifukko.blogspot.com/>) も立ち上げられ、学生が主体となった活動がいまも続いている。地震をきっかけに、学生たちの心の中でこれまで眠っていた何かが目覚め、いい方向に動き出してくれる予感もする。最後に、本学会との関連性については、幸い研究に支障をきたす被害はなかったのと同時に、震災後の日本におけるエネルギー事情に対してはこれまで以上に関心を示す学生がむしろ増えていると実感しており、特に現在のエネルギー供給を支える現実的な選択肢の一つとして、ガスタービンをコアとしたコンバインドサイクル発電技術に対する関心が高まったことは間違いない。本学会でもガスタービン・エネルギー技術発展に向けた活動を通じて、復興と将来のエネルギー供給に貢献していければと思う。



図 18 研究室の被害写真 (職員と学生が普段共有しているスペース。ここに学生がいなかったことが不幸中の幸い)

5. 今後に備えた提言

以上の調査結果から、今回のマグニチュード 9.0 の巨大地震における、ガスタービン設備の今後の対応について、取りまとめる。

設置現場の被害状況は、震度 6 以上の地域での建屋の被害が多く、本体への被害はほとんど見られなかった。また、被災直後のガスタービンの作動状況は、耐震設計指針に基づく施工や、ガスタービン設備の保護装置や緊急措置装置の整備が定期的に行われているところでは、ガスタービン関連の常用設備の異常検知による停止や、非常用設備の起動などは、基本的に正常に機能していた。また、緊急停止したガスタービン設備の大半が数日以内で再稼動しており、再稼動が数週間以上の遅れは、むしろ負荷側の復旧遅れに起因している。また、非常用発電設備では、阪神淡路震災時の調査結果の課題であった電気部品及び配管系に対する耐震性やバッテリーの充電回路に起因する故障はほとんど見られず、耐震性に対する技術の信頼性が向上しており、前回の教訓が活かされた結果となっている。したがって、ガスタービンメーカーの耐震設計、保護装置の基準等は特段の見直しの必要性は認められないが、以下の教訓が得られた。

1) 設置場所の留意

今回の特徴である津波を想定した高所への設置に留意する必要がある。

2) 非常用発電設備の定期的点検・整備の徹底

民間企業での非常用発電設備では、メーカー・ユーザー相互での設備の定期的点検・整備を徹底することにより、故障を防止するうえで装置の信頼性の向上が更に期待できる。

3) 燃料設備多重化の導入評価の実施

今回の震災から、系統連携専用ガスタービンに対しては自立運転対応、都市ガス専焼機に対しては他燃料での運転対応などの要望があり、さらに燃料インフラが絶たれた場合に副生燃料での運転対応などの要望もあることから、燃料多様化が可能なガスタービンの特長を活かし、各種燃料の実用運転の導入評価を促進しておく必要がある。

4) 非常用発電設備の燃料タンク容量の見直し

非常用発電設備では、燃料切れによる停止が散見される。今回の震災において、非常用設備に期待される防災の範囲が、停電対応から災害対応へと広がっており、必要な運転持続時間に対応した容量の燃料タンクの整備等が望まれる。

今回被災の甚大であった東北地域での陸用ガスタービンの設置台数ならびに出力の全体に対する割合は台数では 7%、出力では 3%と少なかったが、今後、東海、東南海、南海での海溝型地震発生が懸念される太平洋沿岸域には、関東、中部、近畿地域の 3 地域のガスタービン設置の合計が台数で全体の 73%、出力では 81%を占め、特に人口比率の高い大都市を含む地域に大半が設置されていることから、今回の地震における課題への対応を進めていくとともに、ガスタービンの優位性を踏まえた発電システムの高効率化、さらなる信頼性の向上等を進めていく必要がある。一方、中長期的には、大型コンバインドサイクルおよび各種分散型電源の最適な組み合わせが望まれる。