



**JAEE**

原子力発電所の地震安全に関する  
地震工学分野の研究ロードマップ

日本地震工学会

原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会  
報告書

第Ⅰ部 研究ロードマップの検討結果

2011年3月

第Ⅱ部 東日本大震災の発生をふまえた補遺

2011年10月

一般社団法人 日本地震工学会

原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会

## 序

本報告書は、日本地震工学会に設置された「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」の成果をとりまとめたものである。本委員会の目的は原子力発電所の地震安全に係る地震工学的研究課題を網羅的に抽出・体系化して地震安全研究ロードマップをとりまとめることであり、同時に日本原子力学会に設置された「原子力発電所地震安全特別専門委員会」と連携して、原子力発電所の地震安全に関する研究ロードマップ形成に地震工学の観点から貢献した(以下、本委員会(日本地震工学会)を「JAE 委員会」、日本原子力学会の委員会を「AESJ 委員会」と略称する)。委員会の設置や活動経過に関する詳細については本文の1.総説を参照されたい。

これらの委員会活動の動機となったのは2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震における東京電力柏崎刈羽原子力発電所の経験であった。地震工学の観点からは、設計値をはるかに上回る地震動に曝されたこと、その状況下でも各原子炉の冷温停止が達成されたこと、これにより設計値を超える地震動下でのプラントの安全性を定量的に評価する課題が提起されたことをふまえ、原子力発電所の地震安全向上のためのリスク課題、耐震裕度、ハザードの理解に関する教訓を引き出し、研究課題を取りまとめることとして、JAE 委員会の活動が展開された。

当初のJAE 委員会の設置期間は2008年10月～2011年3月であり、2011年2月末には最終報告書原稿もほぼ完成していた。そこに2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震が発生し、東日本大震災と呼ばれる大災害をもたらした。この震災の特徴は、地震動災害も軽微なものではないが、それを圧倒的に凌駕する規模で、津波災害が青森県から千葉県までの南北500kmに及ぶ太平洋岸一帯を襲ったことにある。

被災地内には4つの原子力発電所(東京電力福島第一および福島第二、東北電力女川、日本原子力発電東海第二)が立地していたが、そのうち福島第一原発において、地震動下での外部電源喪失とそれに続く津波による非常用電源の機能喪失により、全電源が失われ、これを引き金に炉心熔融に至る過酷事故が発生した。一方、他の3原発では、冷温停止状態が達成された。

この状況下でJAE 委員会がいかに対応すべきか、入念な検討の結果、東日本大震災の影響をふまえた報告書とする方針とし、期間を1年延長して報告書の再構築を行うこととした。その作業は以下の認識のもとに行われた。

- ・委員会報告書原稿の意義:JAE 委員会の動機となった新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所の経験は重要な意味を持つものであり、強震地震動に対する原子力発電所の安全に関する研究ロードマップとして、東日本大震災前に執筆された報告書原稿は十分有意義である。
- ・委員会討議で抜けていた事項:東日本大震災に照らして、これまでの委員会討議で欠けていた2つの重要事項が指摘される。すなわち、リスク課題および耐震裕度における津波への取り組みの不十分さと、ハザードの理解において連動型巨大地震の発生を従来は南海トラフに限定し日本海溝沿いでの発生を想定していなかったことである。この点について報告書を補強することが必要である。

これに基づき、報告書を以下の2部構成として刊行することとした。

### 第I部 研究ロードマップの検討結果(2011年3月)

### 第II部 東日本大震災の発生をふまえた補遺(2011年10月)

第I部には、すでに完成した委員会報告書原稿をそのまま用いることとし、第II部については、委員により新たに執筆が行われた。これにより、当初の委員会設置期間における討議から生み出された資源を無駄にせず、かつ東日本大震災下の津波災害と原子力発電所の挙動に関する位置づけを明らかにして、報告書として遺漏なきを期したものである。特に、第II部を構築するための討議では、リスク論に基づく地震・津波安全策と、現場主義と「科学的想像力」を兼ね備える技術的洞察力の重要性が認識された。

このようにして成立した本報告書において、委員会としての統合的結論は、第I部2.および第II部6.

に示されたロードマップ表である。これは委員の全員参加により練り上げたものであり、各委員が共同責任を負うものである。一方、他の各章については、それぞれの執筆担当者が比較的自由に記述することとし、末尾に執筆者名を明記した。限られた委員会の期間内ですべてについて委員会の統一見解をまとめることは困難であったことも理由であるが、学会という自由な討議の場で、膨大な内容の課題を討議した結果であるから、全体構成についての共通理解があることを前提に、各委員の個性が表現される方が学会活動に相応しいとの判断があった。以上の点をご諒解のうえ、本報告書を活用頂ければ幸いである。

本報告書は、東日本大震災の発生をふまえて、変則的な2部構成となった。震災前に書かれた第Ⅰ部の原稿が地震動対策の報告書として十分意義ありとの上記の見解に変わりはないが、いま改めて読み返すと、その時々の人々の心が反映する文脈には、震災後すべての場面に漲る緊張感が見られないのは当然である。しかしながら、技術者もまた人間であることを図らずも示す今回の経緯をありのままに伝えることも、専門集団といえどもあってよいとの判断で、各委員の了解を得て、震災をふまえた加筆・修正を行うことなく刊行することとした。読者各位には、是非この旨をご了解頂きたいと考える次第である。

福島第一原子力発電所の事故の処理には今後相当の期間を要すること、この事故がもたらした社会的影響の大きさから、原子力発電所の新規プラント建設は不透明な状況にあり、また今後、エネルギー政策が再検討される中で、原子力発電の位置づけが変化していくこともありうる情勢となっている。しかしながら、どの方向を社会が選択するにせよ、原子力発電所の地震安全向上のための技術の錬磨をゆるがせにはならない。福島第一以外の既存の原発の存在ひとつをとってもそれは重要なことである。本報告書がその一助として役立つことを念願するものである。

本報告書は多くの方々のご尽力により成立したものである。まず、この成果は、JAEE委員会の討議に熱心に参加し、原稿を執筆された委員各位の多大な貢献の賜物である。また、本委員会と並行して開催した多くの幹事会における高田副委員長、吉田 望・中村 晋・蛭沢勝三 幹事各位、ならびに中村英孝・日比野憲太（～2010年8月）・山崎宏晃（2009年12月～）事務局幹事各位による入念な討議は、委員会の内容を充実するために不可欠の推進力であった。さらに、報告書の原稿の一部については、委員外の方々にも執筆のご協力を頂いた。本委員会の課題を達成するうえで、現場の情報は不可欠である。この点、オブザーバー参加頂いた東京電力、中部電力、関西電力の方々に多大のご協力を頂いた。

本委員会と連携したAESJ委員会の中村隆夫（2010年7月からJAEE委員会委員兼務）・宮野 廣（2011年4月からJAEE委員会委員兼務）ならびに同安全分科会の成宮祥介・渡辺憲夫の各氏には、この分野横断的な委員会活動の討議に熱心に参加頂いた。さらに、日本原子力学会と日本地震工学会事務局にも全面的な支援を頂いた。

これら関係各位のご尽力に厚く御礼申し上げます。

最後に、東日本大震災の犠牲となられた方々、復興に向けて健闘される被災者の方々、なかんずく福島第一原子力発電所の事故により平和な生活と産業に大打撃を受けられた方々に、深甚なお見舞いを申し上げます。同時に、技術者が果たすべき責任を痛感し、今後も正しい技術の追求を続ける覚悟であることを述べて、しめくりとしたい。

2011年10月

日本地震工学会  
原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会  
委員長・亀田弘行

原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ  
(日本地震工学会 原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会 報告書)

## 目次

序 .....	i-1
原子力発電所の地震安全に関する地震工学研究ロードマップ表 .....	i-3

### 第 I 部 研究ロードマップの検討結果

1. 総説 .....	I-1
1.1 日本地震工学会「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」設立の経緯 .....	I-1
1.2 委員会における討議の要点 .....	I-2
1.3 委員会活動の経緯 .....	I-3
1.4 その他の委員会関連活動 .....	I-5
1.5 本報告書の構成 .....	I-6
2. 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ .....	I-8
2.1 ロードマップ体系の基本構造 .....	I-8
2.2 ロードマップへの反映事項一覧（ロードマップ課題表） .....	I-9
3. 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップの基本事項 .....	I-12
3.1 地震リスク .....	I-12
3.1.1 耐震設計 .....	I-12
(1) 原子力発電所の要求性能 .....	I-12
(2) 不確定下の工学的意思決定 .....	I-13
(3) 設計用地震荷重の設定 .....	I-13
3.1.2 システム評価 .....	I-18
(1) 地震 PSA の適用性向上 .....	I-18
(2) 深層防護を反映した機能防護システムの評価 .....	I-22
(3) 不確定性の同定・低減 .....	I-25
3.1.3 情報基盤（ナレッジのデータベースの整備） .....	I-28
(1) 地震リスクに関する情報基盤整備の意義 .....	I-28
(2) 整備すべきナレッジのデータベース .....	I-28
(3) ナレッジのデータベース整備の課題 .....	I-29
3.2 耐震裕度 .....	I-30
3.2.1 耐震裕度評価の意義 .....	I-30
(1) 耐震裕度評価の地震工学的意義，地震 PSA との関連 .....	I-30
(2) 耐震裕度評価に関する研究・開発の経緯 .....	I-31
(3) 耐震裕度評価の研究課題 .....	I-32
3.2.2 建屋 .....	I-33
(1) 応答評価に関する課題 .....	I-33
(2) 耐力評価に関する課題 .....	I-35

3.2.3	設備 (構造・動的機器)	I-37
(1)	機器・配管系に内在する裕度	I-37
(2)	応答・挙動の解析法	I-37
(3)	裕度評価指標	I-38
3.2.4	地盤	I-39
(1)	地震工学的意義	I-39
(2)	原子力施設における位置づけ	I-39
(3)	研究の現状	I-40
(4)	課題	I-40
3.2.5	屋外重要土木構造物	I-41
(1)	屋外重要土木構造物の位置づけと評価の現状	I-41
(2)	解析手法に関する課題	I-42
(3)	耐力評価に関する課題	I-43
(4)	その他課題	I-44
3.2.6	経年プラントの耐震安全性評価	I-44
(1)	現在の状況分析	I-44
(2)	経年プラントの耐震安全性評価の研究課題	I-45
(3)	産学官の役割分担とロードマップの策定	I-46
(4)	技術課題とロードマップ	I-46
3.2.7	破壊のメカニズム	I-47
(1)	建屋	I-47
(2)	設備	I-49
(3)	地盤	I-52
3.3	ハザードの理解	I-54
3.3.1	地震動評価手法の高度化	I-54
(1)	地震動評価手法の現状	I-54
(2)	水平動/上下動	I-56
(3)	パルスの扱い方	I-57
3.3.2	地震ハザード評価の高度化	I-59
(1)	地震活動評価	I-60
(2)	地震動評価	I-61
3.3.3	対象地震・地震動の決定プロセス	I-63
(1)	地震工学的意義	I-63
(2)	原子力施設における位置づけ	I-63
(3)	研究の現状	I-63
(4)	課題 (破るべき壁)	I-65
4.	研究ロードマップ各論	
4.1	リスク評価法	
4.1.1	リスク論のもとでの基準地震動 $S_s$ の決定法	I-67
4.1.2	性能設計の中での $S_d$ の再構築	I-69
4.1.3	観測記録によるサイト特性への反映	I-72
4.1.4	性能規定に基づく設計	I-74
4.1.5	再起動の評価基準	I-77
4.1.6	耐震設計 (決定論) と残余のリスク (地震 PSA) の統合と体系化	I-80

4.1.7	多数基を対象とした地震リスク評価	I-83
4.1.8	津波 PSA	I-87
4.2	力学モデルに関する共通課題	
4.2.1	耐震裕度	I-89
4.2.2	破壊力学と構造・地盤をつなぐ破壊シミュレーション	I-93
4.2.3	大型振動台による裕度評価・実現象の究明	I-95
4.2.4	減衰（機器・配管系の適切な減衰値）	I-97
4.2.5	機器系で重要となる振動数域まで取り込む動的解析の体系（10～50Hz）	I-100
4.2.6	既設発電所の耐震性能照査	I-106
4.3	建物・構築物	
4.3.1	地震応答解析法のモデル化	I-108
4.3.2	FEMに基づく応答解析と評価体系の確立	I-110
4.4	機器・配管	
4.4.1	機器の地震時の実挙動の解明（観測）	I-113
4.4.2	電気品	I-115
4.5	地盤・斜面	
4.5.1	斜面安定の耐震裕度評価法	I-119
4.5.2	地盤の調査方法と試験方法	I-124
4.5.3	地盤 - 基礎相互作用系の応答解析法のモデル化	I-127
4.5.4	力の釣り合いと変形を包括できる安定・変形解析法	I-132
4.6	屋外重要土木構造物	
4.6.1	屋外重要土木構造物	I-137
4.7	制震・免震	
4.7.1	制震・免震	I-142
4.8	ハザード	
4.8.1	震源調査におけるユーザー側とプロバイダー側の関係と それに基づく調査手法の体系化（ハザードの調査の問題）	I-147
4.8.2	不確定性を踏まえた意思決定プロセスの体系化 （断層・地震動の評価における工学の責任）	I-151
4.8.3	リスク評価における地震像の明確化	I-153
4.8.4	断層～距離減衰式（スペシフィックとオーバーオール，整合性の考え方）	I-155
4.8.5	活断層の評価	I-157
4.8.6	津波波源モデルと震源モデルの統合的理解	I-159
4.8.7	正確な上下動のシミュレーション（ハザード側の問題）	I-161
4.8.8	パルスの動特性と衝撃的破壊の関連	I-163
4.8.9	シミュレーション技法としてのパルス予測（ソースの問題，サイトの問題）	I-165
4.9	社会技術的課題	
4.9.1	原子力発電所の耐震における安全と安心の乖離の解消に向けて	I-167
4.9.2	安全に関する技術説明学分野	I-172
4.9.3	地震防災	I-174
4.9.4	人材育成	I-175
4.9.5	国際リーダーシップ	I-179

第Ⅱ部 東日本大震災の発生をふまえた補遺

1. 総論 .....	Ⅱ-1
2. 東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の発生 .....	Ⅱ-4
(1) 地震とそれにより生じた地震動，津波の特性 .....	Ⅱ-4
(2) 津波による被害 .....	Ⅱ-8
(3) 人的被害と建物の被害 .....	Ⅱ-11
(4) 交通施設の被害 .....	Ⅱ-14
(5) 供給・処理ライフラインの被害 .....	Ⅱ-17
(6) 地盤災害 .....	Ⅱ-25
3. 被災地内の原子力発電所の挙動概要 .....	Ⅱ-30
(1) 被災状況全般 .....	Ⅱ-30
(2) 福島第一原子力発電所 .....	Ⅱ-30
(3) 福島第二原子力発電所 .....	Ⅱ-32
(4) 女川原子力発電所 .....	Ⅱ-33
(5) 東海第二発電所 .....	Ⅱ-34
(6) 各発電所の状況の違いを生じた要因 .....	Ⅱ-34
4. 原子力発電所の挙動から学ぶべき事項 .....	Ⅱ-37
(1) リスク課題に関する事項 .....	Ⅱ-37
1) 詳細な収束シナリオ・事故シナリオ .....	Ⅱ-37
2) 津波に対する残余のリスク概念の導入の必要性 .....	Ⅱ-40
(2) 耐震・耐津波裕度に関する事項 .....	Ⅱ-43
1) 安定と事故を分けた要因 .....	Ⅱ-43
2) 耐津波性能に関する「クリフエッジ」の解消 .....	Ⅱ-52
(3) 本震後の地震工学的事項 .....	Ⅱ-54
1) 3.11 東北地方太平洋沖地震における余震，誘発地震，地殻変動の現状 .....	Ⅱ-54
2) 巨大な余震による地震動の構造物への影響 .....	Ⅱ-55
3) 余震（誘発地震）に対する津波対策 .....	Ⅱ-55
4) 地殻変動の問題 .....	Ⅱ-55
(4) 新しい概念の必要性 .....	Ⅱ-59
1) 低頻度巨大災害に関する概念 .....	Ⅱ-59
2) セーフティ・バースト概念の重要性 .....	Ⅱ-62
5. 原子力発電所に関する地震工学的研究ロードマップ（第Ⅰ部）の検証 .....	Ⅱ-64
(1) リスク概念，地震・津波 PSA の徹底 .....	Ⅱ-64
(2) リスク論・地震工学・津波工学・システム工学の連携による統合的津波対策評価 .....	Ⅱ-69
(3) 防潮堤建設の工学的要点 .....	Ⅱ-72
(4) プラントの水密化のための「耐津波工学」の体系化（防水，耐水，避水による） .....	Ⅱ-76
(5) 巨大な余震のハザード評価技術 .....	Ⅱ-79
(6) ハザード評価における観測資料と計算機科学の協働 .....	Ⅱ-81
(7) 東日本大震災を踏まえた今後の技術的課題について .....	Ⅱ-83

6. 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ（拡充版）	....	II-86
--	------	-------

本報告書の活用に向けて	.....	ii-1
むすび	.....	ii-2

付録

付録1 委員会名簿	.....	付-1
付録2 委員会開催及び関連活動記録	.....	付-3
付録3 議事録	.....	付-8

「原子力発電所の地震安全問題に関する調査研究委員会」  
報告書 申込書

	<input type="checkbox"/> 請求書 <input type="checkbox"/> 見積書 <input type="checkbox"/> 納品書 <input type="checkbox"/> いずれも不要		
氏 名			
報告書代金	<input type="checkbox"/> 日本地震工学会・後援団体会員      8,000 円 (送料込み) <input type="checkbox"/> 非会員    10,000 円 (送料込み)		
支払方法	<input type="checkbox"/> 銀行送金		
	●銀行口座：三菱東京UFJ銀行 田町支店（普通）0103167 ●口座名義：一般社団法人日本地震工学会（イッパ <sup>ン</sup> シヤダ <sup>ン</sup> ホウジ <sup>ン</sup> ホシ <sup>シ</sup> コウカ <sup>ク</sup> カイ）		
	※銀行送金の場合、通信欄に詳細お願いします。 ※振込み手数料は御社にてご負担ください。		
勤務先		所属部署	
連絡先	〒		
	Tel：(又は携帯電話)	E-mail：	
通信欄	●銀行送金の場合 <input type="checkbox"/> 銀行名：_____銀行から    月    日 送金 <input type="checkbox"/> 送金者名：_____		
	<input type="checkbox"/> 振込金額：_____円		