

定格熱出力一定運転の安全性について

平成13年12月7日

原子力安全・保安部会
原子炉安全小委員会

要 旨

定格熱出力一定運転は定格電気出力一定運転に比べ資源、設備のより有効な運転方式であり、海外では一般に実施されている。安全を確保しながら最も効率良くエネルギーを生み出すよう原子力発電所を運転することは、エネルギー有効利用の観点から国民にとって望ましい。

原子炉安全小委員会は、定格熱出力一定運転の実施は原子炉安全上の問題ではなく電気保安上の問題であり、我が国の原子力発電所については、既存の設備を変更することなく定格熱出力一定運転を安全に実施することが可能であることを確認した。具体的な検討はできる限り実機をベースに行うこととし、BWR については東京電力柏崎刈羽原子力発電所 6、7号機を、PWR については関西電力大飯発電所 3、4号機等を代表炉として検討を行った。

検討結果は、以下のとおりである。

1．定格熱出力一定運転とそれへの移行に伴う変化

冬季には海水温度が低いいため復水器真空度が高まり蒸気タービン入口と出口の圧力差が夏季に比べ大きくなるため、同じ熱出力からより大きな電気出力を得ることが可能となる。つまり、海水温度が低くなると自然に熱効率が上昇する。(本文 P.1 図 - 1, 本文 P.2 図 - 2 参照)

「定格熱出力一定運転」とは、原子炉熱出力を原子炉設置許可で認められた最大値である「定格熱出力」に保ったまま運転することである。現在は、電気出力を、年間を通じて発電可能な値である「定格電気出力」に保つ運転、すなわち「定格電気出力一定運転」が行われている。(本文 P.3 図 - 3 参照)

定格熱出力一定運転の効果はプラント毎に異なるが、「運用最大電気出力」(現在のプラントについて定格熱出力を維持した場合に得られる最大の電気出力)は定格電気出力の約 101～108%となり、年間の設備利用率は約 101～105%となる。(資料リスト 別表 1 - 1 参照)

定格熱出力一定運転を実施したとき、定格電気出力一定運転を行った場合の最高値

を超えるのは、電気出力、すなわち蒸気タービンの出力、蒸気タービンの回転力だけである。(資料リスト 別図 1 - 1 , 2 参照)

2 . 定格熱出力一定運転の安全性

原子炉等規制法に基づく規制については、設置許可時の安全審査では原子炉の熱出力に基づいて安全評価を行うとともに、保安規定の認可に当たっても同様に原子炉の熱出力を運転制限値としている。蒸気タービン・発電機により変換して発生される電気出力については、原子炉安全に関係しないことから同法に基づく規制の対象としていない。原子炉の熱出力を変更しない限り、電気出力の変更を行っても原子炉側に安全上の問題が生じることはなく、運転管理に関する「保安規定」の骨格を変更する必要もない。

一方、電気出力についてみると、蒸気タービン・発電機が定格電気出力を超える最大の電気出力である「運用最大電気出力」を発生させることとなる。電気事業者は、電気事業法に基づき原子力発電所の主要な設備を対象に行われる工事計画認可申請時点で、同法に基づく「出力」すなわち定格電気出力状態を条件に蒸気タービン・発電機等の技術基準適合性を確認しており、その結果を国に提出している。従って、電気事業者は定格熱出力一定運転を行う場合には、運用最大電気出力状態での蒸気タービン・発電機の安全性を確認するとともに、その結果を国に報告することが適切である。

そこで、1 . に示した変化を前提に、BWRについては柏崎刈羽原子力発電所 6、7号機、PWRについては大飯発電所 3、4号機を代表炉として選定し、これらのプラントが定格熱出力一定運転を行うものとして、以下に示す項目について、安全性評価を行った。

蒸気タービンの回転力が上昇することで、原子力発電所における内部飛来物として評価が求められるタービン・ミサイル現象の影響を考慮する必要がないとするこれまでの評価結果を変更する必要がないこと。

蒸気タービンの出力が上昇することで、蒸気タービン設備の健全性に問題が生じないこと。

電気出力が上昇することで、電気設備(発電機、主変圧器)の健全性に問題が生じないこと。

電気出力の上昇状態は、十分監視かつ制御可能であること。

評価の結果、以下に示すように上記 ~ のいずれの項目についても安全上の問題はなく、また他のプラントについても同じ思想に基づき設計されていることから、我が国の原子力発電所については、現在設置されている設備や機器を変更することなく定格熱出力一定運転を安全に実施することが可能であると考え。

蒸気タービンの出力が定格電気出力時の出力を上回ることによって影響が想定されるタービン・ミサイル現象（回転する蒸気タービンの車軸や円板が破損し、蒸気タービン車室を破ってミサイルのように飛び出す現象）については、現在、仮想的に蒸気タービンの回転速度（一分間当たりの回転数。以下「回転数」という。）が BWR では定格回転数の 120%、PWR では 118%まで上昇した上で、タービン・ミサイルが発生した場合の原子炉や使用済燃料貯蔵プールに及ぼす影響について評価が行われている。代表炉について定格熱出力一定運転を行うとして確認を行った結果、こうした評価は十分余裕を持ったものであることを確認した。

蒸気タービン設備の詳細設計について、運用最大電気出力状態又はこれを上回る状態で確認を行った結果、メーカーの強度設計においては運用最大電気出力状態を包絡する強度設計評価点を採用していることから、現在の詳細設計であっても問題ないことを確認した。また、実際に設置されている代表的な設備は、数十パーセントから十数倍もの十分な強度余裕を持って製作されており、定格熱出力一定運転により強度上の問題を生じることはない。

発電機の主軸は、蒸気タービンの車軸と同一の条件で設計されていることから、定格熱出力一定運転を実施しても、強度面で問題は生じない。また、運用最大電気出力時にも、発電機及び主変圧器の温度は制限温度以下に保つことができることから、定格熱出力一定運転を実施しても健全性に問題が生じることはない。

電気設備に係る計測制御設備について確認した結果、定格熱出力一定運転による運転範囲は現在設置されている機器の計測制御範囲内にあることを確認した。

3 . 海外の状況

海外では、原子炉熱出力は我が国と同様原子炉安全規制上の運転制限値であるが、電気出力は運転制限値となっていない。また、定格熱出力一定運転は一般的に行われている。

目次

はじめに

第1章 定格熱出力一定運転のしくみ

1．原子炉熱出力と電気出力の関係	1
2．定格電気出力一定運転と定格熱出力一定運転の概要	2
（1）定格電気出力一定運転	2
（2）定格熱出力一定運転	3
（3）定格電気出力一定運転から定格熱出力一定運転に移行した場合の変化	4
（4）運用最大電気出力と定格熱出力一定運転導入の効果	4

第2章 定格熱出力一定運転の安全性

1．電気出力と原子炉安全	5
2．評価すべき内容と評価方法	5
3．評価結果	6
（1）タービン・ミサイル評価への影響	6
（2）蒸気タービン設備の健全性	7
（3）電気設備の健全性	11
（4）計測制御設備と状態監視	12

第3章 海外の状況

1．海外の原子力発電所の運転状況	14
2．海外の規制状況	14
（1）原子炉熱出力規制	14
（2）電気出力規制	14

はじめに

定格熱出力一定運転は、定格電気出力一定運転に比べ資源、設備のより有効な運転方法であり、海外では一般に実施されている。安全を確保しながら最も効率良くエネルギーを生み出すよう原子力発電所を運転することは、エネルギー有効利用の観点から国民にとって望ましい。

本報告書は、「総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会」及びその前身である「資源エネルギー調査会 原子力部会」において原子力発電所の運転効率向上に向けた検討課題の一つとして取り上げられた、原子炉熱出力を原子炉等規制法に基づく設置許可最大値（以下「定格熱出力」という。）に年間を通して維持する運転方法について、これが我が国の原子力発電所に導入された場合の安全性に及ぼす影響について検討した結果をまとめたものである。

検討に当たって、原子炉安全小委員会の下に「原子炉出力一定運転ワーキンググループ」が設置された。本ワーキンググループは、平成13年4月11日から8月9日まで計4回の会合を、原子炉安全小委員会は平成13年10月16日から12月7日まで計2回の会合を開催し、検討を実施した。

本小委員会としては、海外で一般に行われている定格熱出力一定運転について、我が国で商業用原子力発電所が営業運転開始されて以来既に30年以上に亘って実施されてこなかったことを踏まえ、その安全性を確認した技術的判断根拠を、できる限り分かり易く説明すべく作成したものである。

そこで、まず第1章では定格熱出力一定運転とは何かを説明し、次いで第2章では定格熱出力一定運転の安全性について、電気出力と原子炉安全の関連を説明した上で、定格熱出力一定運転への変更が影響する蒸気タービン設備等の健全性等に係る具体的な評価結果を示した。また、第3章では海外の状況について記載した。

第 1 章 定格熱出力一定運転のしくみ

1 . 原子炉熱出力と電気出力の関係

原子炉又は蒸気発生器で発生した蒸気は、図 - 1 に示すとおり蒸気タービンに送り込まれ、蒸気タービンの羽根車を回転させることにより電気を発生させる。その後、蒸気は蒸気タービンを出て復水器に入り、ここで内部に海水が流れる多数の管と接触することにより冷やされ凝縮して水に戻る。蒸気タービン入口で 60～70 気圧(6～7MPa)^(注1)、280 程度あった蒸気の圧力と温度は、蒸気タービンを回転させたこと及び復水器で海水により冷やされることにより低下し、圧力は真空近くまで、また温度は 30～40 程度まで低下する。蒸気タービン入口と復水器の中での圧力差が大きいほど蒸気タービンの羽根車はより強い力で回転するため、より多くの電気が生み出される。

(注1) 1気圧 = 0.1013MPa

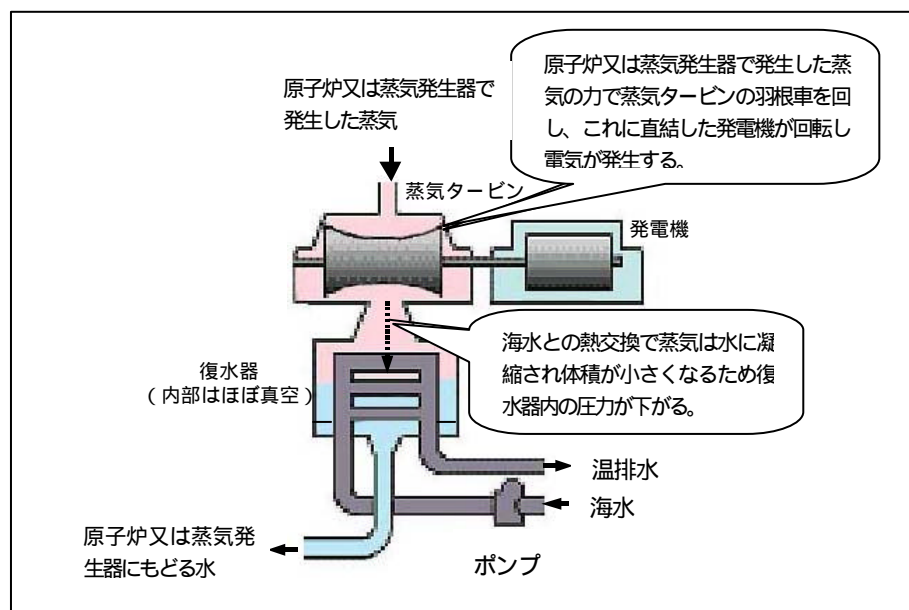


図 - 1 蒸気タービン・発電機と復水器との関係

冬場のように海水温度が低下すると、蒸気はより低い温度で冷やされ、効率良く水に凝縮するため、復水器の内圧(蒸気タービン出口の圧力に等しい)は夏場の 0.08 気圧(真空度約 702mmHg)^(注2) に比べ 0.03 気圧(真空度 735mmHg)^(注2) 程度まで低下する。すなわち、夏場に比べ真空度が高くなる。

(注2) 復水器の内圧が真空状態にどれだけ近いかを表す値を復水器真空度と呼び、この値が大きい程、真空に近いことを意味する。

真空度 760mmHg = 0 気圧 = 0kPa, 真空度 0mmHg = 1 気圧 = 101.3kPa

蒸気タービン入口の蒸気圧力が季節に関係なく一定であるのに対し、冬季には夏季に比べ復水器内の圧力が海水温度の低下に応じて低下するため、蒸気タービン入口と出口間の圧力差が大きくなることから、より多くの電気が発生する。

つまり図 - 2 のように海水温度が低下すると、復水器の真空度は自然に高くなり、原子炉熱出力が電気出力に変換される割合、すなわち熱効率が高くなる。

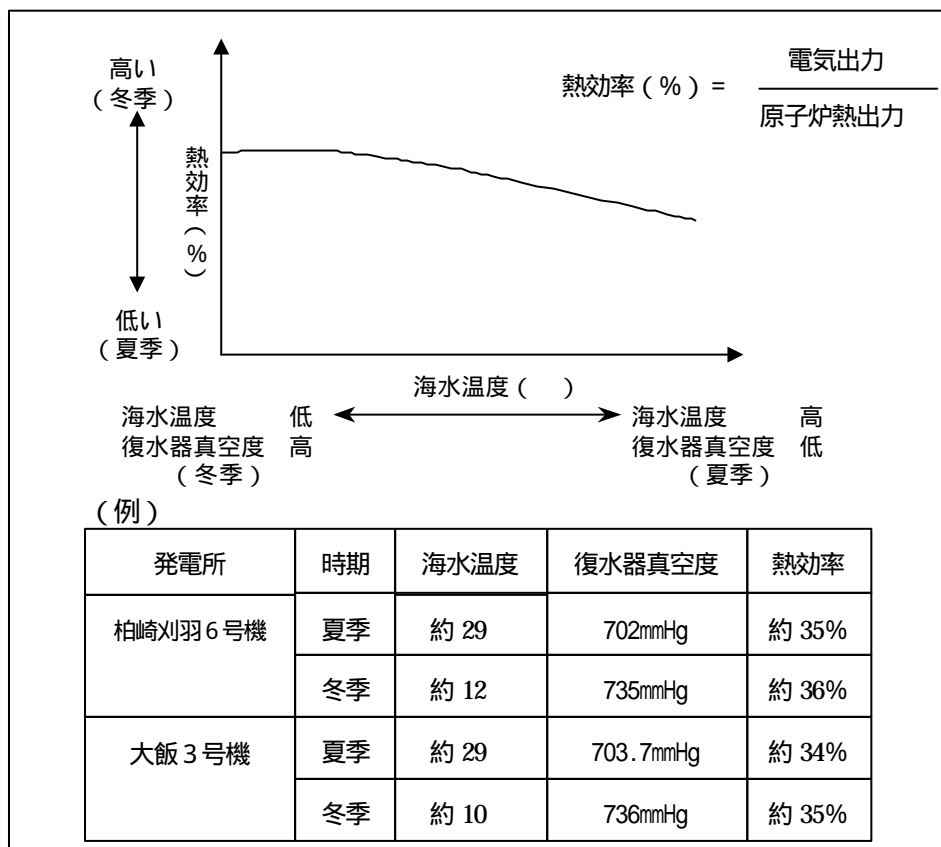


図 - 2 海水温度と熱効率の関係

2. 定格電気出力一定運転と定格熱出力一定運転の概要

(1) 定格電気出力一定運転

現在の我が国の原子力発電所に対する規制では、原子炉の熱出力は原子炉等規制法により最大の熱出力である定格熱出力が設置許可対象となっている。一方、原子炉で発生した熱を変換して発生させる電気出力については、電気事業法に基づき、電気事業者は年間を通じて発生可能な最大値として熱効率が低下する夏季に定格熱出力で運転した場合に発生しうる電気出力（以下「定格電気出力」という。）を届け出なければならない。

こうした規制体系の下、電気事業者は、冬季には自然に熱効率が高くなり定格熱出力で運転すると電気出力が定格電気出力を超えるため、図 3 左側に示すように、冬季には原子炉熱出力を抑えて定格電気出力に保って運転を行っている。このように、年間を通じて電気出力を定格電気出力に保ち、冬季は夏季に比べて原子炉熱出力を抑制する運転を「定格電気出力一定運転」と呼ぶ。

(2) 定格熱出力一定運転

一方、諸外国の原子力発電所では図 - 3 右側に示すように、原子炉熱出力を定格熱出力に保ち、海水温度に応じた電気を発生する（定格電気出力を運転制限値としない）運転が行われている。この運転を「定格熱出力一定運転」と呼ぶ。定格熱出力一定運転を行った場合、電気出力は夏季にほぼ定格電気出力となるが、それ以外の季節は定格電気出力を超え、かつ海水温度に依存して変動する。

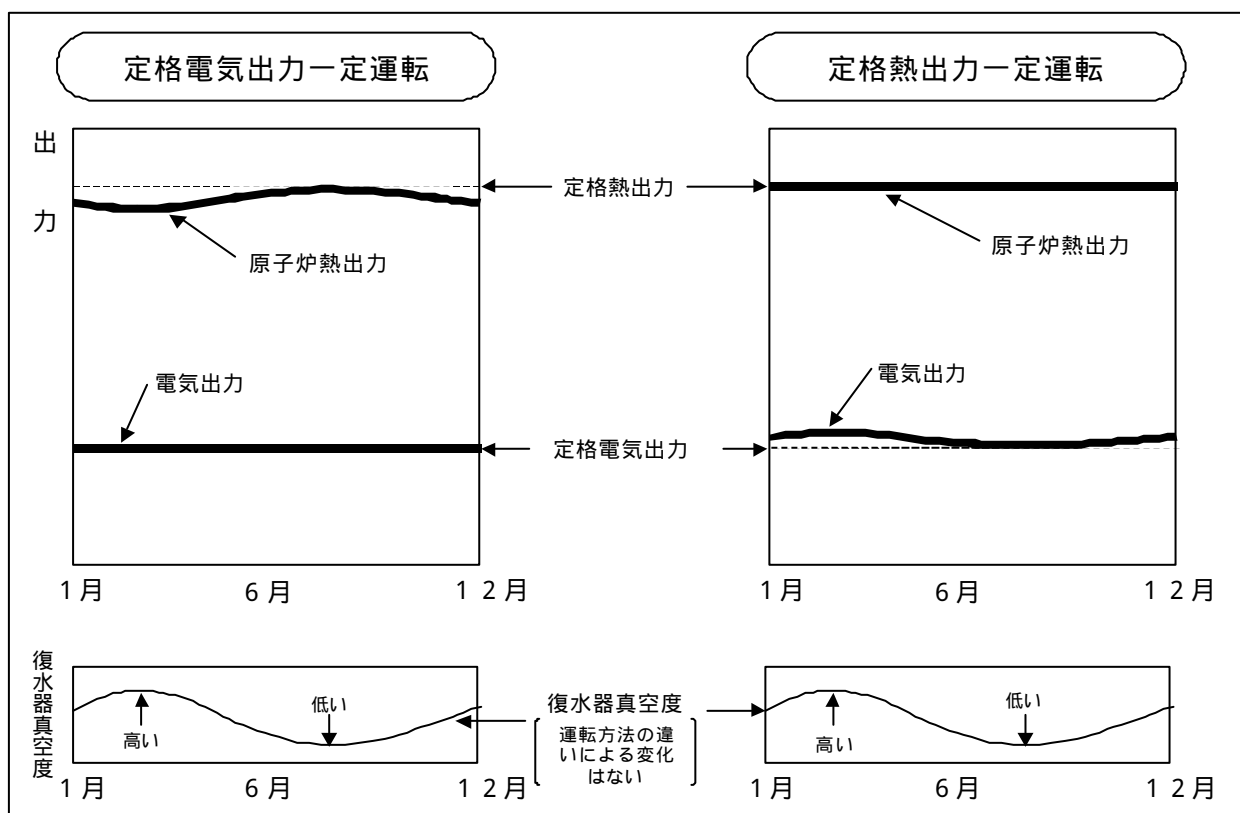


図 - 3 季節による電気出力の変動概念

(3) 定格電気出力一定運転から定格熱出力一定運転に移行した場合の変化

沸騰水型軽水炉 (Boiling Water Reactor ; 以下、「BWR」という。)である東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6、7号機、及び加圧水型軽水炉 (Pressurized Water Reactor ; 以下、「PWR」という。)である関西電力株式会社大飯発電所3、4号機を代表炉として、夏季と冬季に、定格電気出力一定運転と定格熱出力一定運転のプラントの状態 (主要パラメータ) がどのように変化するのかを比較した。(別図1-1、別図1-2)

その結果、夏季については、定格電気出力一定運転と定格熱出力一定運転の間にプラント状態に差はない。

冬季については、定格電気出力一定運転の場合、夏季に比べ主蒸気流量、蒸気タービン入口蒸気流量、給水流量は低下するが、電気出力、主蒸気圧力、給水温度は一定のままである。一方、定格熱出力一定運転の場合、夏季に比べ電気出力だけが大きくなる。

つまり、年間を通じて見れば定格熱出力一定運転を行った場合、主蒸気圧力、給水温度は定格電気出力一定運転時と同様に一定に保たれるとともに、主蒸気流量、蒸気タービン入口蒸気流量、給水流量は定格電気出力一定運転時の最大値を上回ることなく、蒸気タービン出力 (蒸気タービンの回転力) すなわち電気出力だけがこの最大値を上回ることがある。

(4) 運用最大電気出力と定格熱出力一定運転導入の効果

定格熱出力一定運転によって得られる効果は、プラント (発電所の号機) 毎に異なる。

電気事業者が、各発電所立地点における過去5年間程度の海水温度の変動実績などを基に定格熱出力一定運転の効果について試算した結果、熱効率が最大となる最適な海水温度、及び理想的な蒸気タービン設備の状態 (熱交換器の細管の汚れがない状態など) において、原子炉を定格熱出力で運転することにより得られる最大の電気出力 (新たに「運用最大電気出力」^(注)と定義する。) は定格電気出力の約101~108%となると見込まれる。(別表1-1参照)

(注) 後述8ページの図-4に示す「B線 (定格熱出力一定運転時の出力曲線) の最大出力点」を指す。

第2章 定格熱出力一定運転の安全性

1. 電気出力と原子炉安全

第1章に示したように、定格熱出力一定運転を行った場合、定格電気出力状態における評価条件を上回るのは蒸気タービンの出力（蒸気タービンの回転力）すなわち電気出力である。

原子炉等規制法においては、原子炉の安全性を確認する観点から、設置許可時の安全審査では原子炉の熱出力に基づいて安全評価を行うとともに、保安規定の認可に当たっても同様に原子炉の熱出力を運転制限値としている。蒸気タービン・発電機により変換して発生される電気出力については、原子炉安全に関係しないことから同法に基づく規制の対象としていない。原子炉の熱出力を変更しない限り、電気出力の変更を行っても原子炉側に安全上の問題が生じることはなく、運転管理に関する「保安規定」の骨格を変更する必要もない。

一方、電気出力については、蒸気タービン・発電機が定格電気出力を超える最大の電気出力である「運用最大電気出力」を発生させることとなる。電気事業者は、電気事業法に基づき原子力発電所の主要な設備を対象に行われる工事計画認可申請時点で、同法に基づく「出力」すなわち定格電気出力状態を条件に蒸気タービン・発電機等の技術基準適合性を確認しており、その結果を国に提出している。従って、電気事業者は定格熱出力一定運転を行う場合には、運用最大電気出力状態での蒸気タービン・発電機の安全性を確認するとともに、その結果を国に報告することが適切である。

2. 評価すべき内容と評価方法

運用最大電気出力状態での蒸気タービン・発電機の安全性を確認する上で、評価すべき内容を整理すると、以下のとおりである。

蒸気タービンの回転力が上昇することで、原子力発電所における内部飛来物として評価が求められるタービン・ミサイル現象の影響を考慮する必要がないとするこれまでの評価結果を変更する必要がないこと。

蒸気タービンの出力が上昇することで、蒸気タービン設備の健全性に問題が生じないこと。
電気出力が上昇することで、電気設備（発電機、主変圧器）の健全性に問題が生じないこと。
電気出力の上昇状態は、十分監視かつ制御可能であること。

これらの項目について、BWRについては柏崎刈羽原子力発電所6、7号機、PWRについては大飯発電所3、4号機を代表炉として選定し、これらのプラントが定格熱出力一定運転を行うものとして具体的な検討を行った。

3 . 評価結果

代表炉について評価を行った結果、以下に示すように、上記2 . に示すいずれの項目についても安全上の問題はなく、また代表炉以外のプラントについても同じ思想に基づき設計されていることから、我が国の原子力発電所については、現在設置されている設備や機器を変更することなく定格熱出力一定運転を安全に実施することが可能であるとの結論を得た。

(1) タービン・ミサイル評価への影響

(評価結果の概要)

基本設計においてタービン・ミサイルの影響を考慮する必要はないとするこれまでの評価結果を変更する必要はない。

原子力発電所の安全設計においては、高速回転機器の破損や重量構造物の落下等の内部からの飛来物に対し、原子炉施設としての安全を損なうことのない設計であることが求められている。このため、回転する蒸気タービンが破損し、円板や翼が車室を破ってミサイルのように飛び出すタービン・ミサイル現象については、現在、仮想的に蒸気タービンの回転速度(一分間当たりの回転数。以下「回転数」という。)がBWRでは定格回転数の120%、PWRでは118%まで上昇した時点でタービン・ミサイルが発生するものと想定して、原子炉や使用済燃料貯蔵プールが損傷するか否かの評価が行われている。

代表炉の安全審査では、タービン・ミサイルにより原子炉施設が損傷を受ける確率は 1×10^{-7} / 年以下と極めて小さく、基本設計においてタービン・ミサイルの影響を考慮する必要はないと評価されている。今回、定格熱出力一定運転を行うとして再評価した結果、上記回転数についてはこれを変更する必要がなく、また原子炉等までの距離、原子炉建屋の壁厚等評価に使われるその他のパラメータには変化がないことから、タービン・ミサイルによる原子炉施設の破損確率の評価結果は

変わらないことを確認した。

したがって、基本設計においてタービン・ミサイルの影響を考慮する必要はないとするこれまでの評価結果を変更する必要はない。

(2) 蒸気タービン設備の健全性

(評価結果の概要)

代表炉に実際に設置されている蒸気タービン設備は、十分な強度余裕を持って設計、製作されており、蒸気タービンを構成する部品が強度上の問題を生じることはない。
蒸気タービンの制御設計上の問題を生じることはない。
代表炉以外の蒸気タービン設備についても同じ思想により設計されていることを考慮すると、蒸気タービン設備の強度については問題がないと判断する。

定格熱出力一定運転を行った場合、蒸気タービン設備を構成する機器や部品に強度面で問題が生じないか検討した。検討の対象とした機器、部品は車室、円板、隔板及び噴口(静翼)翼、車軸及びカップリングボルト、蒸気タービン基礎ボルト、タービン・オーバースピード^(注)並びに復水器である(別図2-1, 2-2参照)。また、定格熱出力運転を行った場合のタービン・オーバースピードに対する制御設計上の問題が生じないか検討した。

(注) 蒸気タービンの負荷が遮断された場合(落雷による送電線事故などのため、発電機を送電系統から急速に切り離した場合)、蒸気加減弁などが急速に閉止し、蒸気タービンへの蒸気の供給を止める。負荷を失った蒸気タービンは、車室に残留した蒸気エネルギーにより一瞬定格回転数を超える。これをタービン・オーバースピードという。タービン・オーバースピードは強度評価に関連があるため評価対象とし、このオーバースピードが規定値を超えないことの確認を行った。

定格電気出力一定運転と定格熱出力一定運転の場合、復水器真空度によって蒸気タービンの運転状態、蒸気タービン出力(電気出力)がどのように変化するかを概念的に示したのが図-4である。

A線： ———

定格電気出力一定運転の状態である。海水温度がある程度低くなると、原子炉の熱出力を定格値とした場合の蒸気流量（以下「定格蒸気流量（100%）」という。）に維持したままでは蒸気タービン出力（電気出力）が定格値（100%）を超えるため（図中'点）電気出力が一定となるよう原子炉の熱出力を抑え、蒸気流量を絞って運転する。（'点 点方向へ）

B線： - - -

定格熱出力一定運転状態である。B線の上では、原子炉の熱出力は定格値に、蒸気流量は定格値（100%）に維持される。つまり蒸気タービンに流入する蒸気の圧力、温度、流量は一定に維持される一方、海水温度が低下するにしたがって蒸気タービン出力（電気出力）は上昇して定格値（100%）を超える。（'点 点方向へ）

C線： ———

蒸気加減弁全開（Valve Wide Open^(注)；以下、「VWO」という。）時の設計上の仮想的な最大蒸気流量（定格蒸気流量の102～108%程度）が蒸気タービンに流入した状態である。

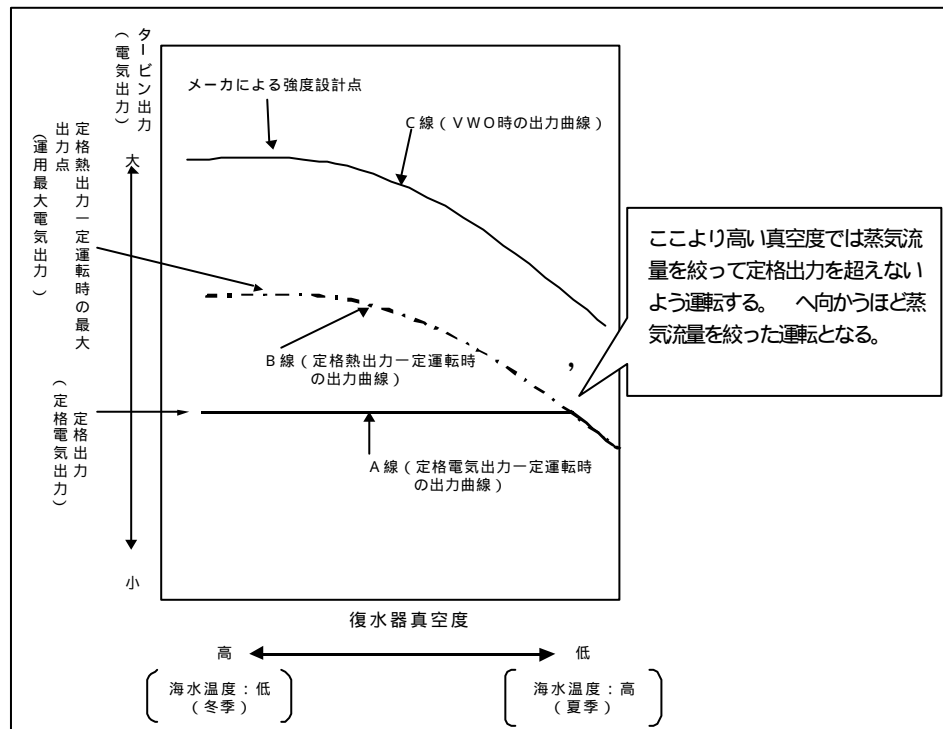


図 - 4 蒸気タービン出力曲線（概念図）

(注) 蒸気タービン入口には、蒸気タービンに流れ込む蒸気流量を調整するため、蒸気加減弁が設置されている。この蒸気加減弁は、定格蒸気流量（100%）が確実に蒸気タービン内に流れ込むことができるよう余裕を持って設計、製造されており、全開することなく100%蒸気流量を達成することができる。VWOとは、この蒸気加減弁を全開にした仮想の状態をいう。なお、この余裕の程度は、プラント毎に異なり、定格流量の102～108%程度の範囲にある。

強度評価を行うには、メーカーが、上記で述べた蒸気タービンの運転状態をどのように考慮し、各機器の設計条件を決め、製造しているかが重要である。この状態が定格熱出力一定運転状態を包絡するものであれば、設計上の問題はない。

結果は、以下に示すとおりである。(別表2 - 1参照)

イ. 蒸気タービンの車室は、蒸気タービンを回転させるための蒸気が流れ込む内部車室と、内部車室から排気された蒸気を内包する外部車室がある。内部車室は、BWRでは原子炉圧力容器で発生する最高の蒸気圧力、PWRでは蒸気発生器で発生する最高の蒸気圧力を最高使用圧力として設計が行われている。外部車室内は復水器につながっており、同じ圧力となるため、考えられる最高の外圧(760mmHg)を考慮して設計される。定格熱出力一定運転においても、蒸気圧力の最大値や最高の外圧は変わらないため、蒸気タービン車室の強度設計に問題を生じることはない。

ロ. 蒸気タービンの円板については、非常调速装置(蒸気タービンへの蒸気供給を急速に遮断する設備)が作動したときに達する回転数に対して構造上十分な機械的強度を有するよう設計されている。柏崎刈羽原子力発電所6、7号機及び大飯発電所3、4号機の場合は、定格回転数の120%で強度評価を実施し問題がないことを確認している。

定格熱出力一定運転時においても通常の调速装置が作動することにより定格回転数を維持するように設計されているが、仮に当該调速装置が作動せず「評価点(運用最大電気出力)」で定格回転数の111%まで蒸気タービン回転数が上昇し、その後非常调速装置が作動した場合であっても、蒸気タービン最大回転数は前述の定格回転数の120%を超えない(柏崎刈羽原子力発電所6、7号機で定格回転数の120%以下、大飯発電所3、4号機で定格回転数の118%以下)。このことから、定格熱出力一定運転を行っても強度設計に問題を生じることはない。

(注)蒸気タービンの定格回転数は、周波数が50Hzの場合は毎分1,500回転、60Hzの場合は毎分1,800回転であり、出力電圧や電流が変動しても変化しない。

ハ. 隔板及び噴口(静翼)翼(動翼)車軸並びにカップリングボルトについては、「評価点」の蒸気加減弁全開(VWO)時の仮想的最大蒸気流量状態を条件に設計されている。定格熱出力一定運転を行う場合は、運用最大電気出力状態を示す「評価点」を超える評価点で強度上問題が生じないことを確認すれば足りるが、「評価点」はこれを上回る条件であることから、強度設計に問題を生じることはない。

ニ. 蒸気タービン基礎ボルトの強度については、「評価点」の蒸気加減弁全開(VWO)時の仮想的な最大蒸気流量状態に、地震による荷重などを組み合わせて設計されている。定格熱出力一定運転を行う場合は、運用最大電気出力状態を示す「評価点」を超える評価

点で強度上問題が生じないことを確認すれば足りるが、「評価点」はこれを上回る条件であることから、強度設計に問題を生じることはない。

- ホ． 負荷遮断時（落雷による送電線事故などのため発電機を送電系統から急速に切り離した場合）に到達する蒸気タービンの最大回転数（タービン・オーバースピード）に対する制御設計は、定格電気出力を前提とした「評価点」で評価を行い、タービン・オーバースピードが非常調速装置（蒸気タービンへの蒸気供給を急速に遮断する設備）の作動回転数（定格回転数の111%以下）を超えないことを確認している。一方、定格熱出力一定運転時には運用最大電気出力状態の「評価点」以上の評価点で評価行う必要がある。

このため、蒸気加減弁全開（VWO）時の「評価点」で再評価を行った結果、運用最大電気出力状態における負荷遮断時の蒸気タービン最大回転数は、非常調速装置の作動回転数を超えない（柏崎刈羽原子力発電所6、7号機：約109%、大飯発電所3、4号機：約105%）ことから、定格熱出力一定運転を行っても蒸気タービンの制御設計上の問題はないことを確認した。

蒸気タービンの制御設計については、原子力用蒸気タービンに適用される技術基準（「発電用火力設備に関する技術基準」第14条）に規定があり、調速装置の能力として「定格負荷を遮断した場合に達する回転速度を非常調速装置が作動する回転速度未満にする能力」を有することを求めているが、定格負荷に加え運用最大電力運転状態での負荷においてもこの能力を有することを求めるよう改正することが必要である。

- ヘ． 復水器については、外部が大気圧で内部が真空になった状態（真空度760mmHg）を条件として構造強度設計されている。定格熱出力一定運転はこの範囲内にあり材料強度上問題を生じることはない。

更に、別表2-2に示すように、柏崎刈羽原子力発電所6、7号機、大飯発電所3、4号機に実際に設置されている蒸気タービン設備について強度評価を行った結果によれば、当該設備は強度設計上の必要肉厚等に比べて数十から数百パーセントもの十分な強度余裕を持って製作されており、蒸気タービンを構成する部品が定格熱出力一定運転に移行しても強度上の問題を生じることはない。

代表炉以外の蒸気タービン設備についても同じ思想により設計、製作されていることを考慮すると、定格熱出力一定運転に移行しても蒸気タービン設備の強度については問題がないと判断する。

なお、工事計画認可申請に際して国が事業者提出を求めている蒸気タービンの強度に関する参考資料における、各部の強度等評価を実施した評価点を確認したところ別表2-1のとおり、車軸及び

カップリングボルトの評価点（PWRのみ）、タービン基礎ボルトの評価点（耐震設計クラスの違いからBWRのみ）及びタービン・オーバースピード評価点（BWR、PWR）については「評価点」で実施されている。このため、定格熱出力一定運転を行うに当たっては、これらの評価についても運用最大電気出力状態を示す「評価点」以上の条件での強度計算等の評価結果を記載するよう、国は電気事業者を指導することが適切である。

（3）電気設備の健全性

（評価結果の概要）

代表炉について評価した結果、運用最大電気出力は、発電機及び主変圧器の構成部品各部の温度上昇限度によって定まる出力より小さい値になっており、発電機及び主変圧器の健全性を損なわずに運転しうることを確認した。したがって、発電機及び主変圧器の健全性に問題は生じない。代表炉以外の電気設備についても、同じ思想により設計されていることから、発電機出力が構成部品各部の温度上昇限度によって定まる出力以下となるよう、電気事業者が運転管理を行うことにより、発電機及び主変圧器の健全性に問題が生じることはないと判断する。

定格熱出力一定運転を行った場合、発電機及び主変圧器に機械的強度面及び熱的な面で問題が生じないか検討した。（別図2 - 3参照）

イ．機械的強度評価

発電機の主要構造物である主軸の強度設計は、蒸気タービンの車軸と同一の条件で設計されている。したがって、第2章2項ハ．で示したように、定格熱出力一定運転を実施しても強度面では問題を生じない。

ロ．熱的評価（別添2 - 1参照）

電気設備は通電することにより発熱し温度が上昇するため、発電機及び主変圧器の健全性が損なわれないよう、通電による発熱を冷却する装置を設け、構成部品各部の温度上昇を制限値以下に抑えている。

なお、過大な通電により構成部品各部の温度が上昇し過ぎないように、電気事業者は、常に電力計により監視を行い、発電機が制限値以下の出力で運転され、主変圧器等の健全性が保たれていることを確認している。

代表炉について評価した結果、表 1に示すように、運用最大電気出力は、発電機及び主変圧器の構成部品各部の温度上昇限度（固定子コイルの場合、柏崎刈羽原子力発電所6号機：74、

大飯発電所3号機：70)によって定まる電気出力より小さい値になっており、定格熱出力一定運転時においても、発電機及び主変圧器の健全性を損なわずに運転しうることを確認した。したがって、定格熱出力一定運転においても、発電機及び主変圧器の健全性に問題は生じない。

表 1 代表炉の発電機出力

	柏崎刈羽原子力発電所6号機	大飯発電所3号機
定格電気出力	135.6万kW	118万kW
運用最大電気出力	142万kW	121万kW
部品の温度制限値より定まる電気出力	147.8万kW	128万kW

代表炉以外の電気設備についても、同じ思想により設計されていることから、定格熱出力一定運転に移行しても、発電機出力が構成部品各部の温度上昇限度によって定まる電気出力以下となるよう、電気事業者が運転管理を行うことにより、発電機及び主変圧器の健全性に問題が生じることはないと判断する。

(4) 計測制御設備と状態監視

(評価結果の概要)

代表炉の計測制御設備について確認した結果、いずれの機器も現在設置されている機器の計測制御範囲内にあることを確認した。
 代表炉以外の計測制御設備についても、同じ思想により設計されていることから、問題ないと判断する。
 状態監視に関しては、監視項目や監視方法が従来から大きく変わることはなく、運転員の負担が増加するものではない。

イ．計測制御設備

計測制御設備は、監視や制御の対象となっている設備の運転状態を十分監視できなければならない。定格熱出力一定運転によって定格電気出力一定運転時の最高値を超えるのは電気出力のみである。なお、電気出力に関連する計測制御設備は電気設備の設備容量に基づいて設計されているため、設備容量範囲以内での運転であれば計測制御範囲を超えることはない。

代表炉の計測制御設備について確認した結果、いずれの機器も定格熱出力一定運転時における運転範囲は現在設置されている機器の計測制御範囲内にあることを確認した。(別表2-3参照)

代表炉以外の計測制御設備についても、同じ思想により設計されていることから、定格熱出力一定運転に移行しても問題ないと判断する。

ロ．状態監視

原子力発電所では、運転員は運転操作を行わない時にも常にプラントは正常に動いているか、何らかの異常の予兆はないか判断するために、その稼働状態を監視しておく必要がある。

定格熱出力一定運転の実施がこうした状態監視にどのような影響を及ぼすかについて確認を行った。

(イ) 監視項目の重要度の変化

現在の定格電気出力一定運転では、運転員は、原子炉等規制法に基づく要求事項である「原子炉熱出力を定格値（100%）以下となるよう維持して運転すること」と同時に、「電気出力を定格値（100%）以下となるよう維持して運転すること」の双方が守られているか監視している。

定格熱出力一定運転時には、運転員は、「原子炉熱出力を定格値（100%）以下となるよう維持して運転すること」については引き続き監視する必要がある。一方、電気出力については、「電気出力が、発電機及び主変圧器の部品の温度上昇限度により定まる出力以下であること」について監視すれば良い。

(ロ) 原子炉熱出力の監視方法について

現在、原子炉熱出力については過去1時間の平均値及び過去1分間の平均値の双方を適時監視しており、定格熱出力一定運転時にこれを変更する必要はない。

(ハ) 発電機及び主変圧器の監視方法について

監視項目である発電機の有効電力、無効電力の瞬時値と有効電力の積算記録（過去1時間の積算値）の双方を適時監視しており、定格熱出力一定運転時にこれを変更する必要はない。

以上の結果から、定格熱出力一定運転を実施することによって、監視項目や監視方法が従来から大きく変わることはなく、運転員の負担が増加するものではない。

第3章 海外の状況

1 . 海外の原子力発電所の運転状況

諸外国の原子力発電所について、月別に最も設備利用率の高かった発電所のデータによると、設備利用率は100%を超えるものが多い。(別表3 - 1 参照)

このことは、定格熱出力一定運転が一般的に行われていることを示している。

そこで、電気事業者を通じ米国の運転状況を入手した。

Florida Power & Light Co. St. Lucie 発電所2号機では、年間を通じて原子炉熱出力はほぼ一定に保たれる一方、電気出力は変動しており、定格熱出力一定運転が行われている。(別図3 - 1 参照)

2 . 海外の規制状況

(1) 原子炉熱出力規制

米、仏、独の三カ国を対象に原子炉熱出力の規制の有無について調査を行った結果、いずれの国においても、原子炉熱出力は原子炉安全規制上の規制対象であり、運転制限値となっていることが確認された。(別表3 - 2 参照)

(2) 電気出力規制

米、仏、独の三カ国を対象に電気出力の規制の有無について調査を行った。(別表3 - 2 参照)
米国においては、原子力安全に関する連邦規則(10CFR)に基づく原子炉の最終安全解析書に電気出力の記載はあるが、運転制限値とはなっていない。また同国では電気事業規制は州の権限となっていることから、ニューヨーク州(The Public Service Law)、カリフォルニア州(California Code of Regulations/ Title 20)及びテキサス州(Texas Administrative Code / Title 16 Economic regulation)における電気事業規制に関する州法についても調査を行った。ニューヨーク州、カリフォルニア州及びテキサス州においては、発電所の新設時、増設時及び申請した設備能力を改造等に伴い変更する場合(ニューヨーク州においては5万kWを超える場合)には、設備能力に関する申請を行っており、その中には電気出力の記載があるため規制対象ではあるが、申請した電気出力は運用の上限値とはなっていない。

仏国においては、原子力安全に関する政令 (Décret n 63-1228 du 11 Decembre, 1963) に基づき、原子炉設置許可申請書相当に電気出力が記載されているが、運転制限値とはなっていない。

独においては、原子力の平和利用及びその危険の防護に関する法律 (Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren) に基づく電気出力に関する記載はなく、運転制限値とはなっていない。

以上に示したように、海外でも、原子炉熱出力は我が国と同様、安全規制上の運転制限値であるが、電気出力は運転制限値ではない。また、米国の電気事業規制においても、電気出力は規制対象であるが、運用の上限値とはなっていない。

原子炉安全小委員会委員名簿

(敬称略・五十音順)

委員長	班目 春樹	東京大学大学院工学系研究科教授
	青山 博之	東京大学名誉教授
	朝田 泰英	社団法人火力原子力発電技術協会技術顧問
	阿部 勝征	東京大学地震研究所教授
	石川 迪夫	財団法人原子力発電技術機構特別顧問
	石塚 信	財団法人原子力安全技術センター 客員研究員
	石野 栞	東海大学工学部教授
	大橋 弘忠	東京大学大学院工学系研究科教授
	岡 芳明	東京大学大学院工学系研究科教授
	川上 泰	財団法人原子力研究バックエンド推進センター専務理事
	近藤 駿介	東京大学大学院工学系研究科教授
	斯波 正誼	財団法人原子力発電技術機構特別顧問
	辻川 茂男	東京大学名誉教授
	宮崎 慶次	滋賀職業能力開発短期大学校校長
	吉川 榮和	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授

原子炉出力一定運転WG委員名簿

(敬称略・五十音順)

主 査	大橋 弘忠	東京大学大学院工学系研究科教授
	秋葉 雅史	早稲田大学理工学総合研究センター客員教授
	石島 清見	日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部次長
	仁田 旦三	東京大学大学院工学系研究科教授
	宮 健三	慶応義塾大学大学院理工学研究科教授

資料リスト

第1章関連

- ・別図1 - 1 定格熱出力一定運転導入前後におけるプラント主要パラメータの比較概要 (BWR) 1
- ・別図1 - 2 定格熱出力一定運転導入前後におけるプラント主要パラメータの比較概要 (PWR) 2
- ・別表1 - 1 定格熱出力一定運転実施により想定される電気出力の増分の概略評価 3

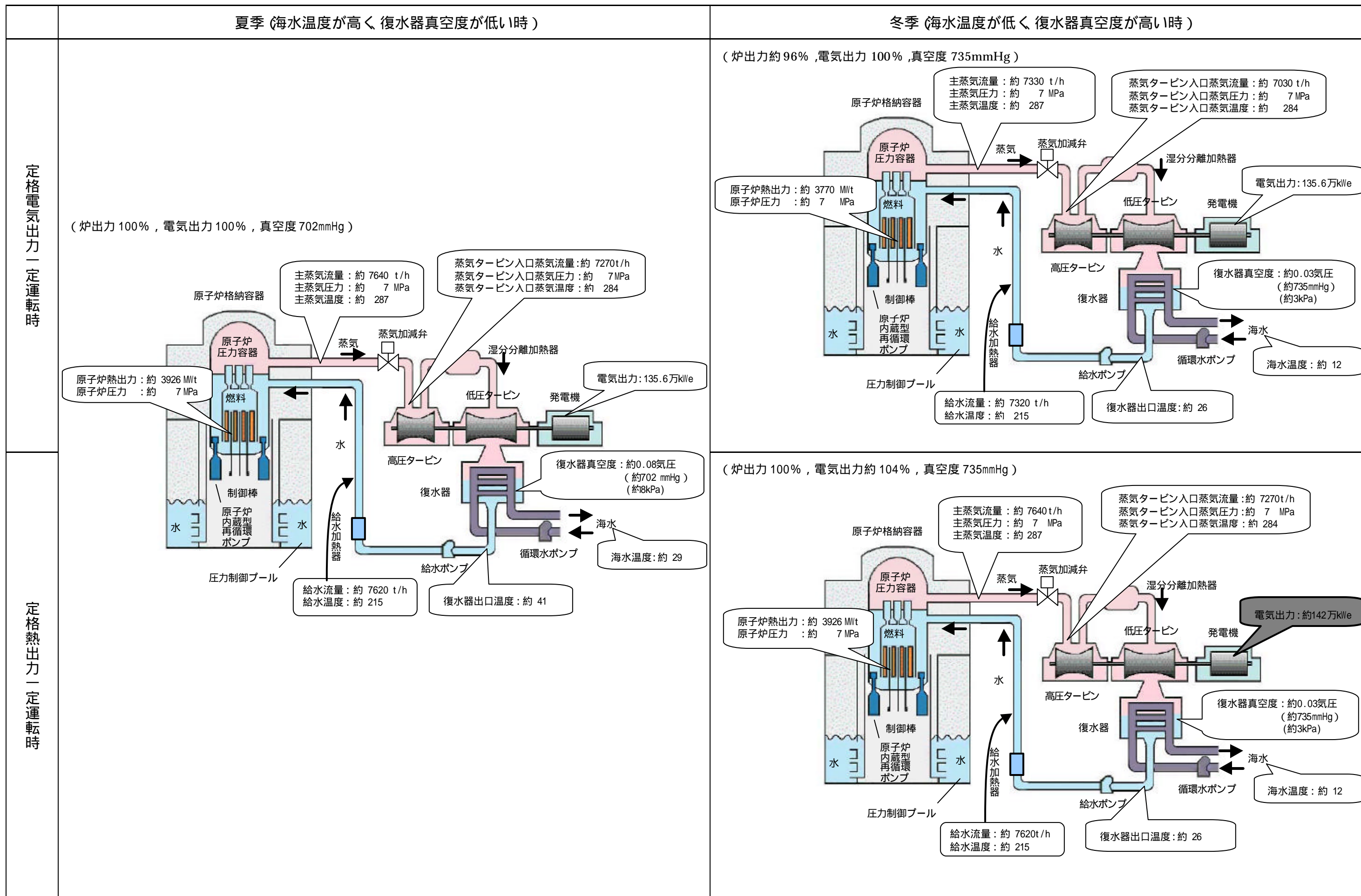
第2章関連

- ・別図2 - 1 蒸気タービン構造図例 4
- ・別図2 - 2 復水器構造図例 5
- ・別表2 - 1 定格熱出力一定運転に伴う蒸気タービン設備の健全性評価 6
- ・別表2 - 2 蒸気タービン本体の強度評価結果並びにタービン・オーバースピード評価結果 7
- ・別図2 - 3 発電機及び主変圧器の構造図例 8
- ・別添2 - 1 熱的な面から見た発電機及び主変圧器の健全性評価 9
- ・別表2 - 3 定格熱出力一定運転における計測制御設備の影響評価について 12

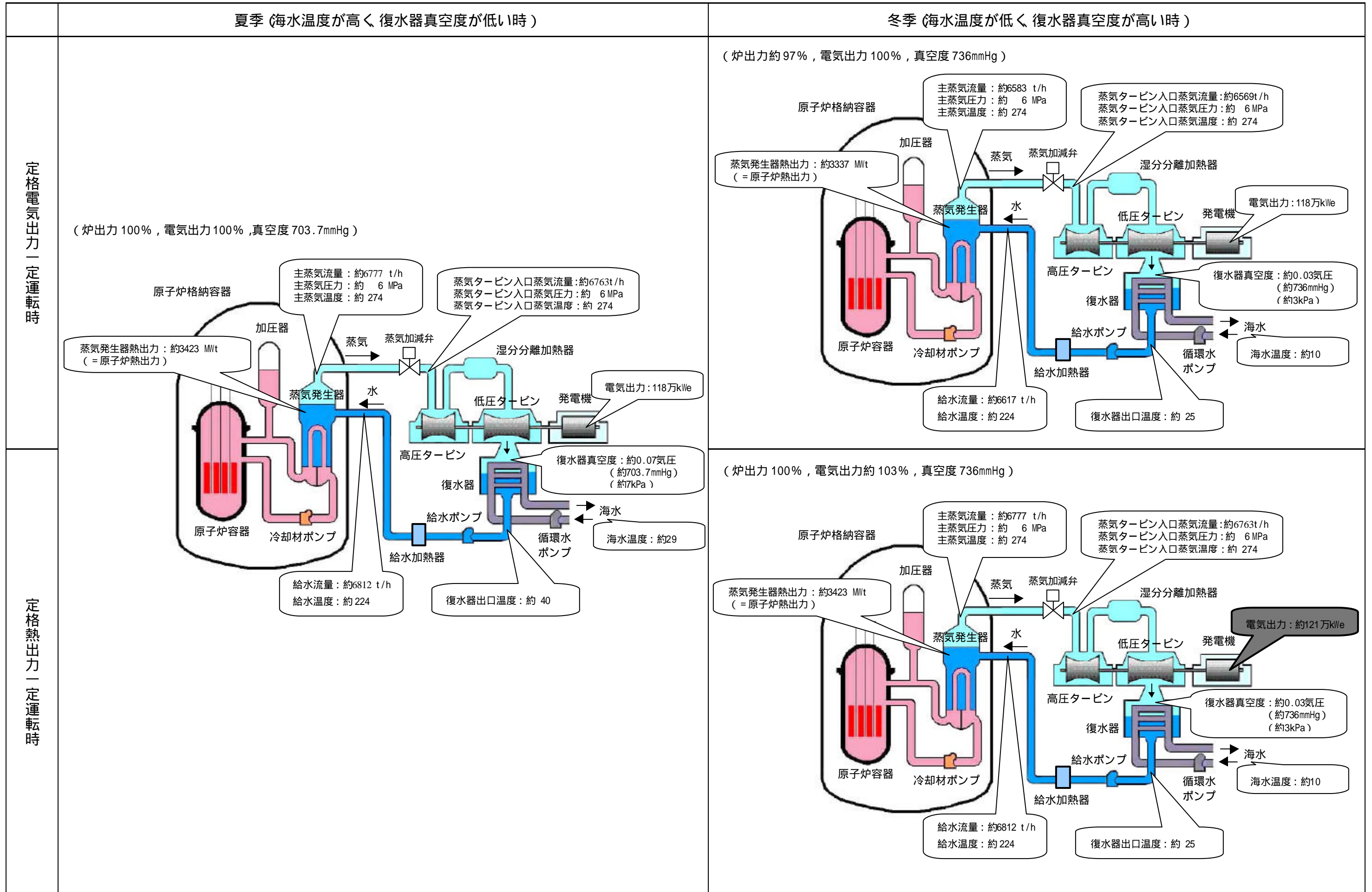
第3章関連

- ・別表3 - 1 海外の原子力発電所の設備利用率 13
- ・別図3 - 1 St. Lucie 発電所2号機の運転状況 (2000年) 14
- ・別表3 - 2 海外の規制状況について 15

別図 1- 1 定格熱出力一定運転導入前後におけるプラント主要パラメータの比較概要 (BWR)



別図 1-2 定格熱出力一定運転導入前後におけるプラント主要パラメータの比較概要 (PWR)



別表 1 - 1 定格熱出力一定運転実施により想定される電気出力の増分の概略評価

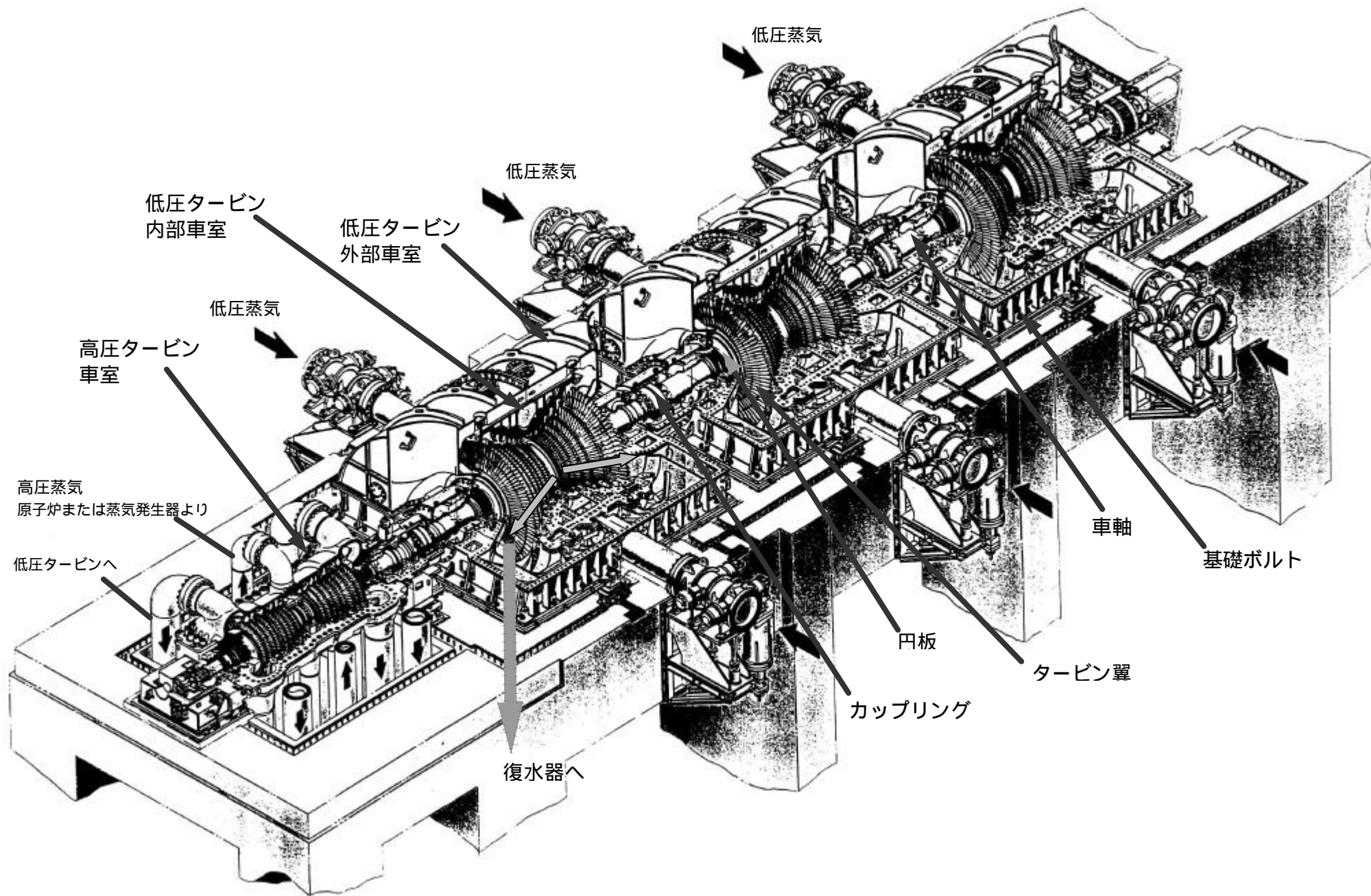
プラント	運転開始	定格電 気出力 (万kW e)	(注1) 電気出力の増分の最大値		(注1) 電気出力の増分の平均値	
			(万kW e 程度)	(%程度)	(万kW e 程度)	(%程度)
泊 1 号	平成01/06/22	57.9	3	5	1.7	2.9
泊 2 号	平成03/04/12	57.9	3	5	1.6	2.8
女川 1 号	昭和59/06/01	52.4	1	2	0.5	1.0
女川 2 号	平成07/07/28	82.5	2	2	1.2	1.5
福島第一 1 号	昭和46/03/26	46.0	3	7	1.6	3.5
福島第一 2 号	昭和49/07/18	78.4	3	4	1.3	1.7
福島第一 3 号	昭和51/03/27	78.4	2	3	0.6	0.8
福島第一 4 号	昭和53/10/12	78.4	2	3	0.9	1.1
福島第一 5 号	昭和53/04/18	78.4	2	3	0.8	1.0
福島第一 6 号	昭和54/10/24	110.0	2	2	1.0	0.9
福島第二 1 号	昭和57/04/20	110.0	3	3	1.2	1.1
福島第二 2 号	昭和59/02/03	110.0	2	2	0.8	0.8
福島第二 3 号	昭和60/06/21	110.0	2	2	0.8	0.8
福島第二 4 号	昭和62/08/25	110.0	2	2	1.1	1.0
柏崎刈羽 1 号	昭和60/09/18	110.0	2	2	1.2	1.1
柏崎刈羽 2 号	平成02/09/28	110.0	5	5	3.2	2.9
柏崎刈羽 3 号	平成05/08/11	110.0	3	3	1.7	1.6
柏崎刈羽 4 号	平成06/08/11	110.0	2	2	1.1	1.0
柏崎刈羽 5 号	平成02/04/10	110.0	2	2	1.2	1.1
柏崎刈羽 6 号	平成08/11/07	135.6	6	4	4.7	3.5
柏崎刈羽 7 号	平成09/07/02	135.6	6	4	4.3	3.1
浜岡 1 号	昭和51/03/17	54.0	2	4	0.8	1.4
浜岡 2 号	昭和53/11/29	84.0	2	2	0.3	0.4
浜岡 3 号	昭和62/08/28	110.0	3	3	1.3	1.2
浜岡 4 号	平成05/09/03	113.7	2	2	0.9	0.8
志賀 1 号	平成05/07/30	54.0	2	4	1.1	2.0

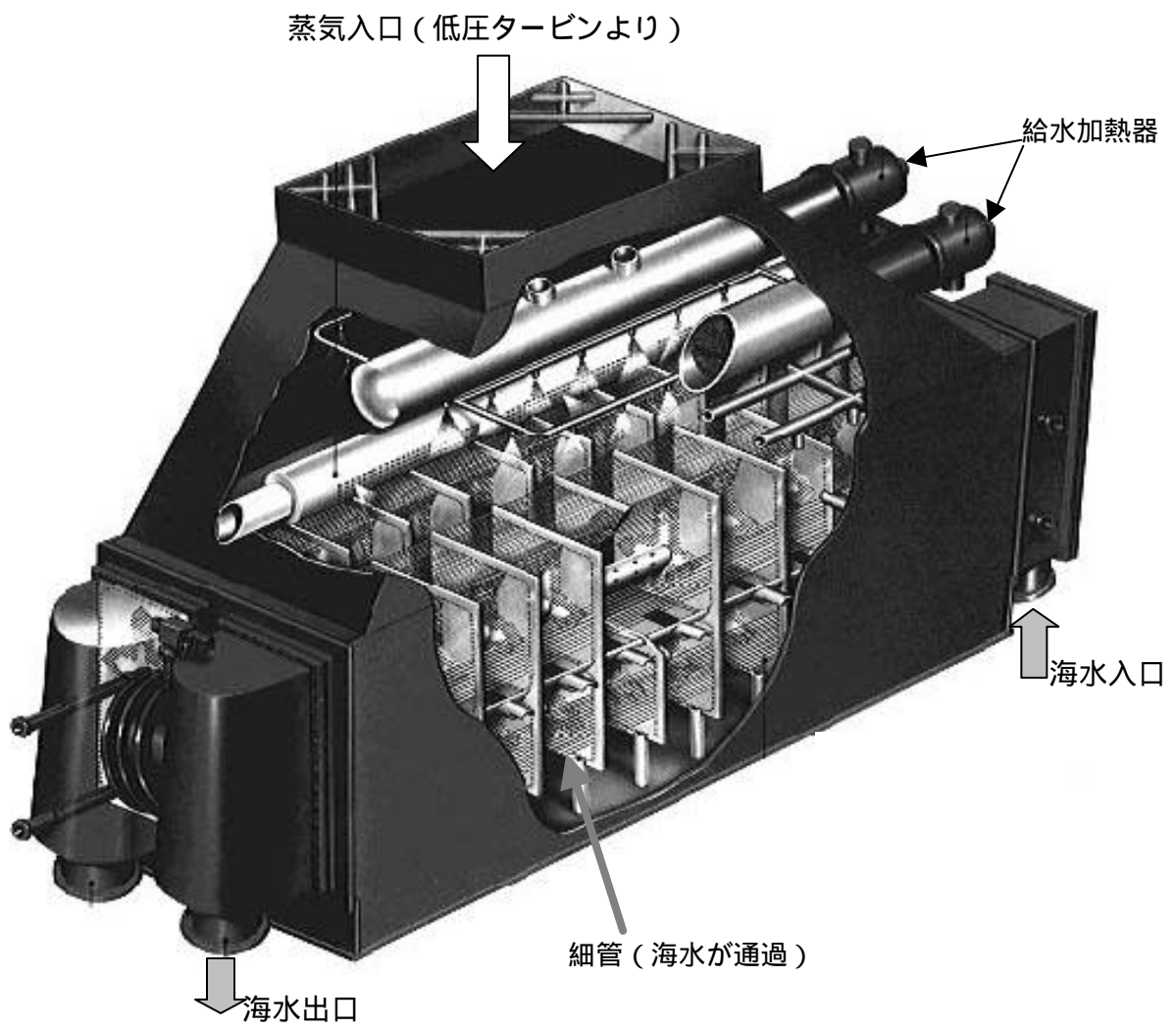
プラント	運転開始	定格電 気出力 (万kW e)	(注1) 電気出力の増分の最大値		(注1) 電気出力の増分の平均値	
			(万kW e 程度)	(%程度)	(万kW e 程度)	(%程度)
美浜 1 号	昭和45/11/02	34.0	2	6	0.8	2.4
美浜 2 号	昭和47/07/25	50.0	3	6	1.3	2.6
美浜 3 号	昭和51/12/01	82.6	5	6	2.9	3.5
高浜 1 号	昭和49/11/14	82.6	7	8	4.3	5.2
高浜 2 号	昭和50/11/14	82.6	5	6	3.3	4.0
高浜 3 号	昭和60/01/17	87.0	5	6	3.8	4.4
高浜 4 号	昭和60/06/05	87.0	5	6	3.7	4.2
大飯 1 号	昭和54/03/27	117.5	3	3	1.7	1.5
大飯 2 号	昭和54/12/05	117.5	4	3	2.0	1.7
大飯 3 号	平成03/12/18	118.0	3	3	2.0	1.7
大飯 4 号	平成05/02/02	118.0	3	3	2.2	1.9
島根 1 号	昭和49/03/29	46.0	2	4	1.1	2.3
島根 2 号	平成01/02/10	82.0	3	4	1.1	1.4
伊方 1 号	昭和52/09/30	56.6	2	4	1.2	2.1
伊方 2 号	昭和57/03/19	56.6	4	7	2.1	3.7
伊方 3 号	平成06/12/15	89.0	4	4	2.8	3.2
玄海 1 号	昭和50/10/15	55.9	3	5	2.0	3.5
玄海 2 号	昭和56/03/30	55.9	2	4	1.3	2.3
玄海 3 号	平成06/03/18	118.0	4	3	2.0	1.7
玄海 4 号	平成09/07/25	118.0	2	2	1.4	1.2
川内 1 号	昭和59/07/04	89.0	2	2	1.2	1.4
川内 2 号	昭和60/11/28	89.0	2	2	1.2	1.3
東海第二	昭和53/11/28	110.0	1	1	0.5	0.4
敦賀 1 号	昭和45/03/14	35.7	1	3	0.4	1.0
敦賀 2 号	昭和62/02/17	116.0	4	3	2.9	2.5
合 計		合 計			合 計	
51 プラント		4,492			86.1	1.9

(注1) 過去の運転実績を基に計算した概算値であり、運転管理などをより詳細に評価した場合、変動する可能性がある。

別図 2 - 1 蒸気タービン構造図例

4

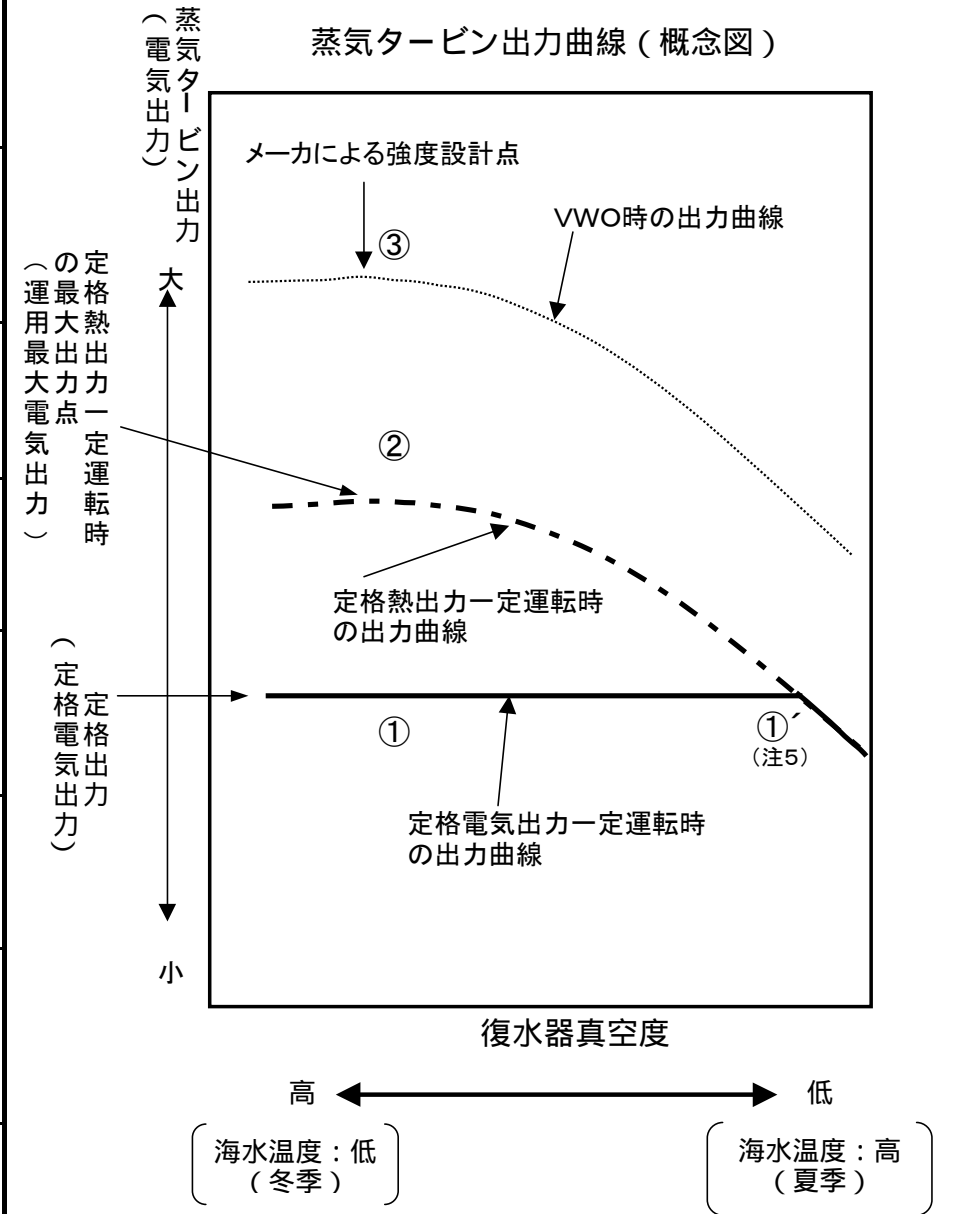




別図 2 - 2 復水器の構造図例

別表2-1 定格熱出力一定運転に伴う蒸気タービン設備の健全性評価(BWR: 柏崎刈羽原子力発電所6/7号機, PWR: 大飯発電所3/4号機)

評価項目	メーカーによる強度設計点		工事計画認可申請書 添付資料・参考資料での評価点		定格熱出力一定運転	評価結果	定格電気出力、定格熱出力、VVO時出力の関係			
	BWR (柏崎刈羽6/7)	PWR (大飯3/4)	BWR (柏崎刈羽6/7)	PWR (大飯3/4)						
蒸気タービン	車室	最高使用圧力(内車室) 真空度760mmHg(外車室)	評価応力: 内圧, 外圧	同左	同左 (注4)	最高使用圧力以下 真空度760mmHg以下	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○		
	円板	120%定格回転数	評価応力: 遠心応力	同左	同左 (注4)	120%定格回転数以下 (蒸気タービンの定格回転数に変化はなく、また非常调速装置の作動後に到達しうる最大回転数)	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○		
	隔板及び噴口(静翼)	VVO時の蒸気流量(注1)で静翼に生じる曲げ応力	評価応力: 曲げ応力	③	同左	同左 (注4)	定格蒸気流量で静翼に生じる曲げ応力	②	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○
	翼	・120%定格回転数における遠心力 ・VVO時の蒸気流量で動翼に生じる曲げ応力	評価応力: 遠心応力、曲げ応力	③	同左	同左 (注4)	・100%定格回転数 ・定格蒸気流量で動翼に生じる曲げ応力	②	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○
	車軸及びカップリングボルト	VVO時の蒸気流量で発生する最大電気出力	評価応力: せん断応力	③	同左	① (注4)	運用最大電気出力(注3)	②	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○
	蒸気タービンの基礎ボルト	VVO時の蒸気流量で発生する最大電気出力に地震を考慮した回転モーメント	評価応力: 引張応力	③	①	① (注2)	運用最大電気出力による回転モーメント	②	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○
	タービン・オーバースピード	定格電気出力時の蒸気タービンの加速エネルギー	非常调速装置の作動速度である111%を超えないこと	①	①	①	運用最大電気出力時の蒸気タービンの加速エネルギー	②	メーカー設計点 < 定格熱出力運用点	運用最大電気出力(②)及びVVO時(③)にて再評価
復水器	真空度760mmHg	評価応力: 外圧	同左	同左	—	真空度760mmHg以下	メーカー強度設計点 > 定格熱出力運用点	○		



(注1) VVO: バルブワイドオープン(蒸気加減弁全開)。強度設計上、VVO時の定格蒸気流量(100%)に対して102~108%程度の仮想的最大蒸気流量を使用している。
 (注2) PWRについては詳細設計方針のみが確認されているが、2次系冷却材によるタービン駆動であり、耐震Cクラスのため、計算書は添付されていない。
 (注3) 運用最大電気出力とは、定格熱出力一定運転時の蒸気タービン・発電機の最大電気出力
 (注4) 大飯3/4号申請当時は蒸気タービン強度評価の参考資料の添付要求がなかったが、現在の工事認可申請時には添付されている。
 (注5) 原子炉熱出力を定格値とした場合の蒸気流量に維持したままで、海水温度がある程度低くなると、蒸気タービン出力(電気出力)が定格値(100%)を超える点。

別表 2-2 蒸気タービン本体の強度評価結果並びにタービン・オーバースピード評価結果

(1) 蒸気タービン本体の強度評価結果

下記表に、蒸気タービン本体の強度評価を示す。表中の値は、柏崎刈羽 6/7 (BWR) と大飯 3/4 (PWR) についての最小肉厚に対する設計肉厚の比率、または、許容応力に対する発生応力の比率である。車室強度は最高使用圧力、それ以外の強度評価は VWO 時の蒸気流量で行っている。

1. 車室強度

(車室胴部の強度)

評価部位	高圧車室	低圧内部車室
設計肉厚 / 必要最小肉厚	1.4 ~ 1.6	

(高圧タービン管台部の強度)

評価部位	主蒸気入口部	抽気部	高圧排気部
設計肉厚 / 必要最小肉厚	1.3 ~ 1.2		

2. 円板強度

(非常调速装置が作動したときに達する回転数^{*1}以上の評価用回転数(代表炉では定格回転数の 120% 回転数)における低圧タービン円板強度)

評価部位	各段落	
平均接線応力に対する強度	応力比(許容応力/各応力)	2.0 ~ 5
中心孔部応力に対する強度		1.5 ~ 2
翼溝部の強度		2.6 ~ 1.6

3. 翼(静翼)の強度

評価部位	各段落
蒸気力に対する強度 応力比(許容応力/曲げ応力)	5.7 ~ 8.0

4. 翼(動翼)の強度

(非常调速装置が作動したときに達する回転数^{*1}以上の評価用回転数(代表炉では定格回転数の 120% 回転数), 低圧タービン)

評価部位	各段落
翼根元部の強度 応力比(許容応力/遠心+曲げ応力)	2.2 ~ 1.4

5. 車軸強度

評価事象	通常運転時	短絡時
軸強度 応力比(許容応力/捩り応力)	3.6 ~ 8	1.4 ~ 5
カップリングボルト強度 応力比(許容応力/せん断応力)	5.3 ~ 1.2	1.8 ~ 6

^{*1}...非常调速装置が作動したときに達する回転数(運用最大電気出力状態)

柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号機で定格回転数の 120% 回転数、大飯発電所 3/4 号機で定格回転数の 116% 回転数と評価された。

(2) タービン・オーバースピード評価

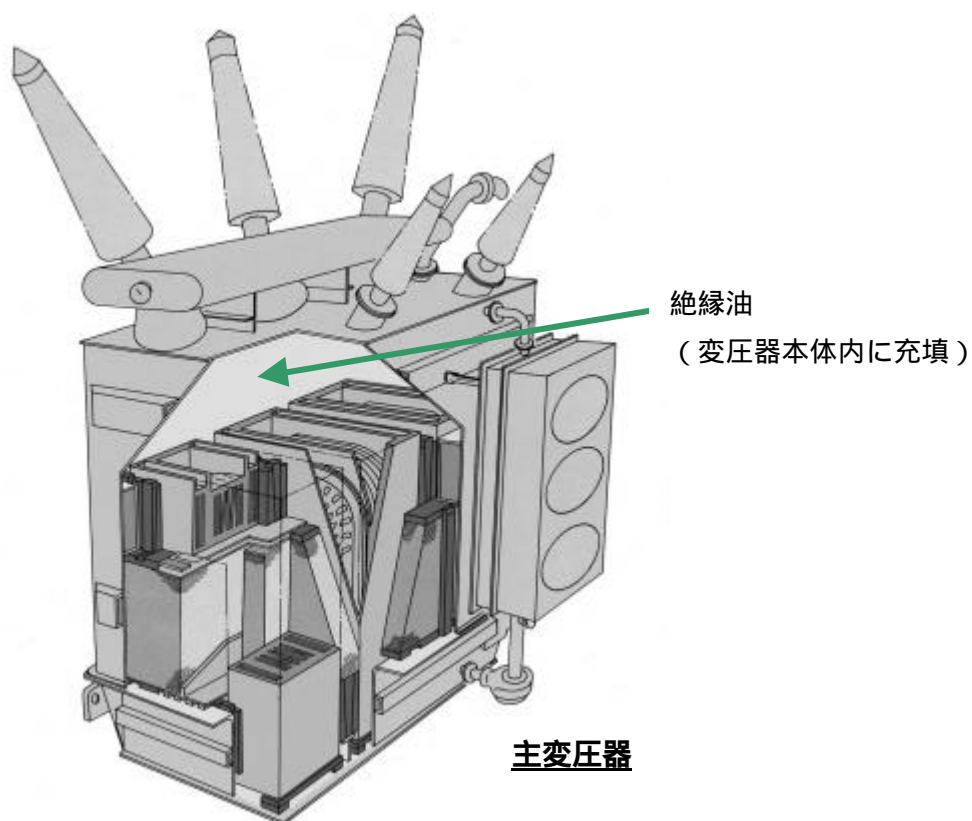
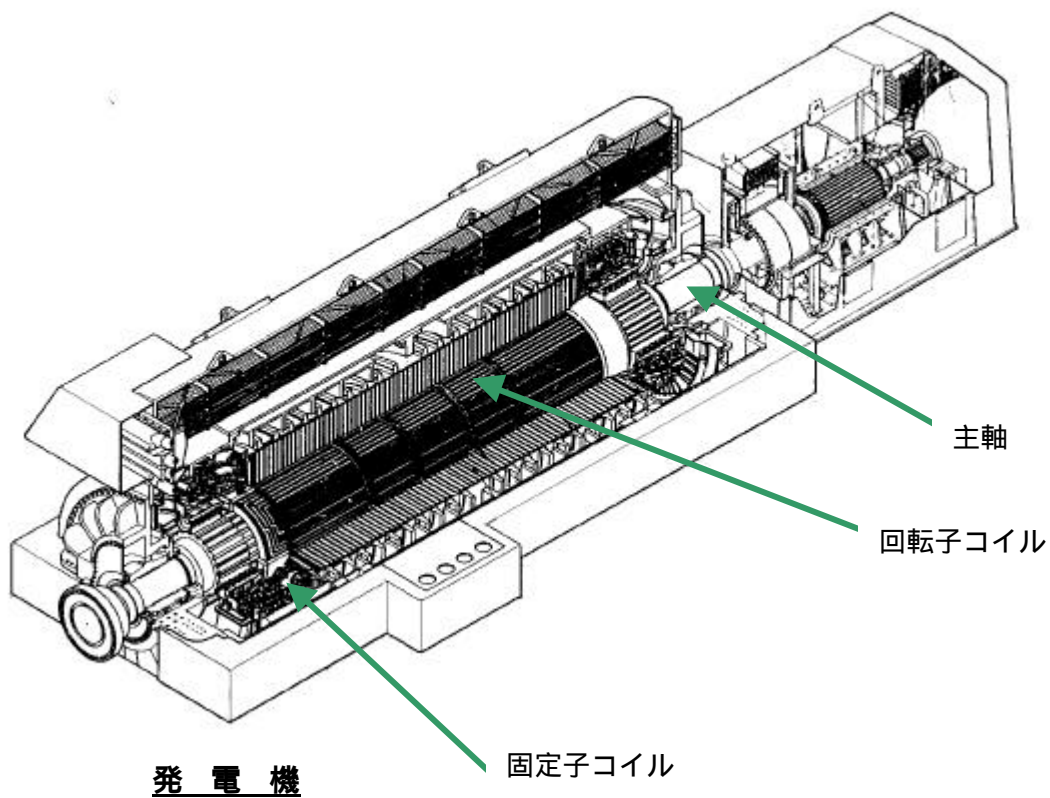
負荷遮断時オーバースピード(VWO時)

評価基準：非常调速装置作動回転数(定格回転数の 111% 回転数)へ達しないこと。

(単位：%)

大飯 3/4 号	柏崎刈羽 6/7 号機
105	109

注) : 大飯 3/4 号は負荷遮断試験値からの評価値



別図 2 - 3 発電機及び主変圧器の構造図例

熱的な面から見た発電機及び主変圧器の健全性評価

発電機及び主変圧器の最大能力は、発電や変圧できる電気の電圧と電流の積 (kVA) で表され、これを設備容量と言う。また、電気設備は通電することにより発熱し温度が上昇するため、発電機及び主変圧器の健全性が損なわれないよう、発電機の固定子コイル、回転子コイル及び主変圧器コイルについて、設備容量をベースに熱的設計が施されており、また過大な通電に至らないよう運転範囲が決められ、構成部品各部の温度を制限値以下に抑えている。図 3 - 1 にこれらの関係を示す。

図中の曲線 ~ で示される運転制限範囲を決める具体的な手順は、概略以下の通りである。

- ・まず、プラントの定格電気出力 P_L を決める。(柏崎刈羽原子力発電所 6 号機:135.6 万 kW、大飯発電所 3 号機 : 118 万 kW)
- ・電力系統側の要求 (力率 $\cos \phi$) により傾きが決められる直線 と P_L より A 点が決まる。
- ・A 点の出力を安定して供給できるよう直線 上に B 点を設定し、設備容量を決める。(柏崎刈羽原子力発電所 6 号機 : 154 万 kVA、大飯発電所 3 号機 : 131 万 kVA)
OB の長さが設備容量を、AB の長さが設計余裕を示す。設計余裕の大きさは、電気事業者、プラント毎に異なる。
- ・発電機の設備容量をもとに、主変圧器の設備容量を決める。
- ・B 点を設計点として、曲線 ~ を定める。これらの曲線によって囲まれた内側の範囲が、運転制限範囲である。

曲線 : 回転子コイルの温度を許容温度以下とするために回転子の電流 (界磁電流) を制限する曲線

曲線 : 固定子コイルの温度を許容温度以下とするために固定子コイル電流 (電機子電流) を制限する曲線

曲線 : 主変圧器絶縁油の温度を許容温度以下とするために主変圧器の運転容量を制限する曲線

上記のように定められた運転制限範囲に対し、定格電気出力一定運転時の発電機の運転範囲は、 P_L 点 - C 点の間となる。なお実際には、A 点よりかなり下 (力率 $\cos \phi = 0.95$)

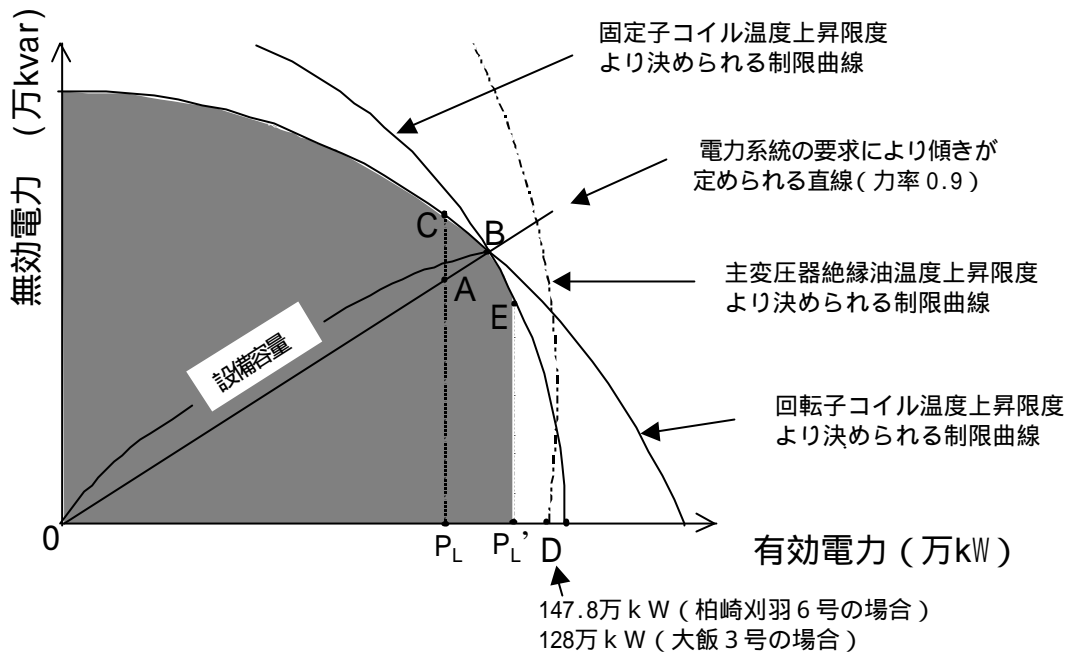
～1.0)で通常運転されている。電気設備の通電量は有効電力²と無効電力³により決まるため、電気事業者は、常に電力計(有効電力計、無効電力計)を使って有効電力と無効電力を監視し、発電機が制限範囲内で運転され、発電機と主変圧器の健全性が保たれていることを確認している。

代表炉について評価した結果、図3-1に示すように、運用最大電気出力 P_L' (柏崎刈羽原子力発電所6号機:142万kW、大飯発電所3号機:121万kW)は制限曲線によって定まるD点(柏崎刈羽原子力発電所6号機:147.8万kW、大飯発電所3号機:128万kW)より内側となっており、定格熱出力一定運転時においても、制限範囲内の運転範囲(P_L' 点-E点間)で発電機及び主変圧器を運転しうることを確認した。したがって、定格熱出力一定運転においても、発電機と主変圧器の健全性に問題は生じない。

代表炉以外の電気設備についても、同じ思想により設計されていることから、定格熱出力一定運転に移行しても、電気事業者が機器設計範囲内で運転管理を行えば、その健全性に問題が生じることはないと判断する。

なお、実施に際しては、念のため運用最大電気出力を示す P_L' 点がD点より左側にあることをプラント毎に個別に確認することが必要と考える。

- 1:力率とは、発電機で発生した電力のうち、有効電力(次項参照)の比率のことで、0～1.0の間の値をとる。我が国の原子力発電所については0.9程度で設計され、実際の運転では、0.95～1.0で推移していることが多い。
- 2:有効電力とは、発電機で発生した電力のうち、実際に利用できる(エネルギーとして消費される)電力である。発電機出力は、有効電力の大きさを表す。
- 3:無効電力とは、発電機で発生した電力のうち、電源と負荷の間を行き来するのみで、実際には利用できない電力である。消費者に一定の周波数と電圧で安定して電気を送るために必要な電力で、需要家の負荷が大きい夏場などには、より多くの無効電力を必要とされることがある。



	柏崎刈羽原子力発電所 6号機	大飯発電所 3号機
設備容量	154 万 kVA	131 万 kVA
定格電気出力 P_L	135.6 万 kW	118 万 kW
運用最大電気出力 P_L'	142 万 kW	121 万 kW
回転子コイル温度上昇限度	64	65
固定子コイル温度上昇限度	74	70
主変圧器絶縁油温度上昇限度	55	55

A : P_L 及び直線 により定まる点

B : 直線 上、A 点の上側に設定。OB の長さが設備容量、AB の長さが設計余裕を示す。
 曲線 ~ は、B 点を基準に定められる。

C : P_L - A の延長線と曲線 の交点

定格電気出力運転時の運転範囲は、 P_L 点 ~ C 点となる。

D : 曲線 と横軸の交点

E : 有効電力 = P_L' となる曲線 上の点

定格熱一定運転時の運転範囲は、 P_L' 点 ~ E 点となる。(運転制限範囲は 部)

有効電力：発電機で発生した電力のうち、実際に使用できる
 (エネルギーとして消費される) 電力

無効電力：発電機で発生した電力のうち、電源と負荷の間を
 行き来するのみで実際には利用できない電力

図 3 - 1 定格熱出力運転に伴う電気設備の健全性

(BWR : 柏崎刈羽原子力発電所 6号機、 PWR : 大飯発電所 3号機)

別表 2 - 3 定格熱出力一定運転における計測制御設備の影響評価について

< B W R > (東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所 6 号機)

主なパラメータ	定格電気出力 一定運転	定格熱出力 一定運転	測定範囲	検討結果
発電機固定子コイル温度	68.3 ¹	70.4 ³	0 ~ 150	影響なし
主変圧器絶縁油温度	60.0 ¹	69.7 ³	0 ~ 84	影響なし
有効電力	1356MW	1420MW ⁴	0 ~ 1700M	影響なし
無効電力	503MVar ²	596MVar ⁴	-900 ~ 900MVar ⁵	影響なし

1 : 平成 12 年 8 月から平成 13 年 7 月までの最大値

2 : 平成 11 年 1 月から平成 12 年 12 月までの最大値

3 : 使用前検査時の実測値を設備容量で運転した場合に換算した温度
(発電機の冷却水温 46、変圧器の外気温を 40 とした値)

4 : 表-1 の想定される有効電力及び、この有効電力と設備容量から求めた無効電力

5 : 無効電力は通常時プラスとする運用であるが、設備上考えられるマイナス値での運転時にも測定可能なよう、測定範囲を設定している。

< P W R > (関西電力株式会社大飯発電所 3 号機)

主なパラメータ	定格電気出力 一定運転	定格熱出力 一定運転	測定範囲	検討結果
発電機固定子コイル温度	67.4 ¹	69.5 ³	0 ~ 120	影響なし
主変圧器絶縁油温度	72.6 ¹	75.2 ³	0 ~ 120	影響なし
有効電力	1180MW	1210MW ⁴	0 ~ 1800MW	影響なし
無効電力	405MVar ²	502MVar ⁴	-1000 ~ 1000MVar ⁵	影響なし

1 : 平成 12 年 7 月から平成 13 年 6 月までの最大値

2 : 平成 12 年 1 月から平成 12 年 12 月までの最大値

3 : 使用前検査時の実測値を設備容量で運転した場合に換算した温度
(発電機の冷却水温 46、変圧器の外気温を 40 とした値)

4 : 表-1 の想定される有効電力及び、この有効電力と設備容量から求めた無効電力

5 : 無効電力は通常時プラスとする運用であるが、設備上考えられるマイナス値での運転時にも測定可能なよう、測定範囲を設定している。

別表 3 - 1 海外の原子力発電所の設備利用率

(単位：%)

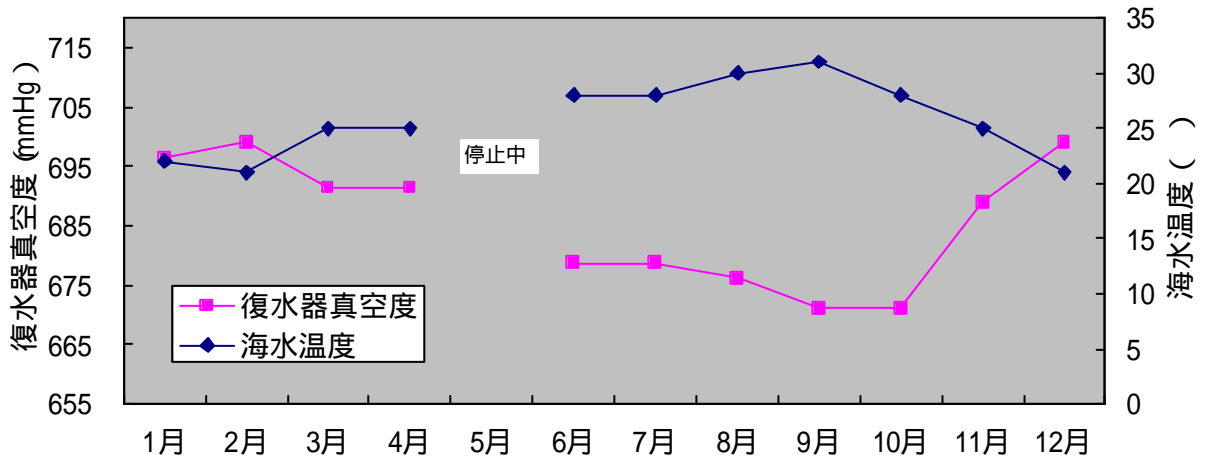
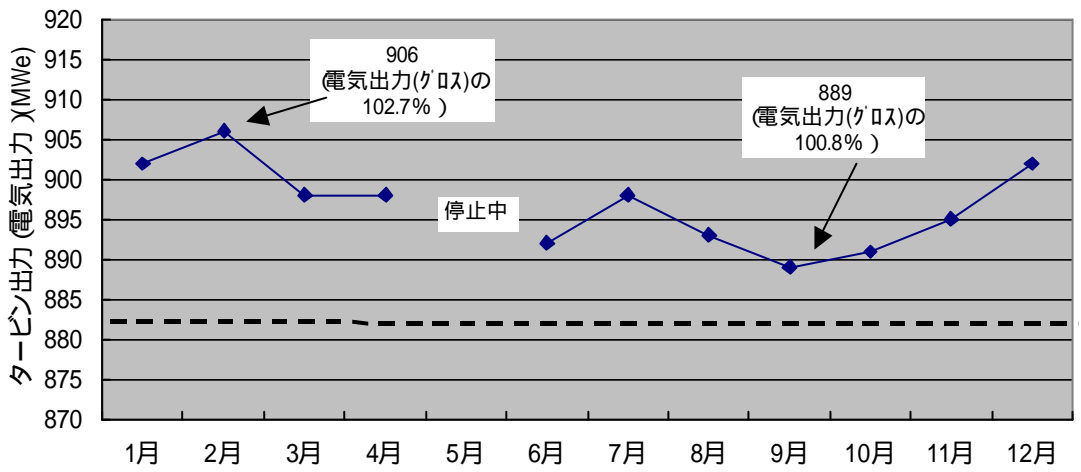
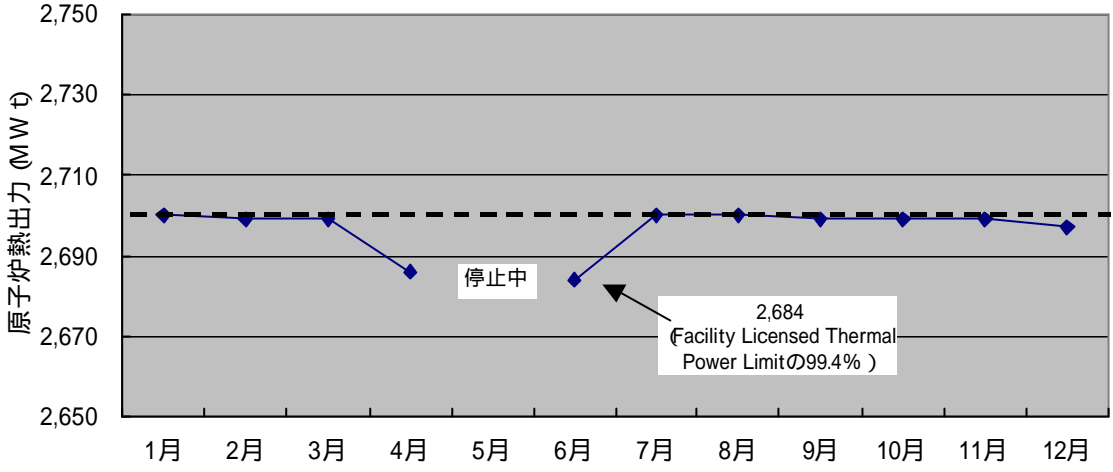
年月 国名	1998年度 冬季				1999年度 冬季			
	1998年12月	1999年1月	1999年2月	1999年3月	1999年12月	2000年1月	2000年2月	2000年3月
ベルギー	102.89	102.83	102.94	102.90	103.22	102.76	103.05	103.00
イギリス	100.73	100.80	102.57	101.24	100.59	100.60	100.59	100.46
カナダ	99.99	98.91	100.56	100.67	101.18	101.07	100.78	99.85
フィンランド	101.41	101.83	101.57	101.43	101.41	101.64	102.06	101.60
フランス	101.03	101.76	100.67	97.78	98.29	-	99.91	101.01
ドイツ	103.42	103.62	103.29	102.45	102.63	102.69	102.66	102.34
ハンガリー	102.40	99.78	102.31	102.19	102.60	102.00	102.52	101.12
日本	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
ロシア	101.85	101.75	101.76	99.65	103.02	102.11	102.44	102.81
韓国	105.85	105.89	106.03	105.76	105.96	106.21	106.60	106.50
スウェーデン	100.20	100.99	101.12	100.93	100.99	101.08	100.97	99.67
スイス	105.69	105.27	102.09	101.15	101.77	102.59	101.73	101.23
台湾	100.82	100.49	100.42	100.57	101.77	102.32	102.34	102.32
米国	105.70	104.21	104.10	103.95	103.99	103.82	104.09	104.66

注) データは、各国の保有する原子力プラントの中で、その月に最大を記録したプラントの設備利用率を示す。
 - : データなし

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{発電電力量}}{\text{タービン公称出力} \times \text{歴時間}}$$

出典) ニュークレオニクスウィーク

Facility Licensed Thermal Power Limit : 2,700MW t (NRCの公称データによる)
 電 気 出 力 (グ ロ ス) : 882 MWe (原産会議発行の「世界の原子力発電開発の動向」による)
 炉 型 : PWR (2ループ)
 営 業 運 転 開 始 年 月 : 1983.8
 復 水 器 冷 却 水 : 海水



注) データは、Florida Power & Light Co.からの聞き取りによるものであり、毎月1日の05:00のデータである。

別図3 - 1 St.Lucie 発電所 2号機の運転状況 (2000年)

別表3-2 海外の規制状況について

国名	分類	規制調査対象		原子炉熱出力		電気出力		
		法規名/州	条文	記載内容	規制の対象	記載内容	規制の状況	
米	電気事業 規制	New York State Consolidated Laws/Public Service / ニューヨーク州	Article 10 Section 162			申請書に設備能力(capacity of the facility)として電気出力の記載がある。	発電所の新設、増設時及び5万kWを超える改造時には申請 (apply) が必要であるが、申請された電気出力は運転制限値となっていない。	
		California Code of Regulations / Title 20 / カリフォルニア州	Section 1704			申請書に電気出力(capacity of the generating)の記載がある。	発電所の新設及び増設時には設備能力に関する申請 (apply) が必要であるが、申請された電気出力は運転制限値となっていない。	
		Texas Administrative Code / TITLE 16 ECONOMIC REGULATION / PART 2 PUBLIC UTILITY COMMISSION OF TEXAS / テキサス州	25.109			申請書に電気出力(capacity rating in megawatts)の記載がある。	発電所の新設及び増設時には設備能力に関する申請 (provide) が必要であるが、申請された電気出力は運転制限値となっていない。	
	原子炉安全 規制	10CFR (Regulatory Guide) (SRP)	50.34 (申請書の内容)	Regulatory Guide1.70によりFSARのイントロダクションに原子炉熱出力の記載がある。また、タービン発電機関連箇所に原子炉熱出力の記載がある。	原子炉熱出力は規制対象であり、変更する場合は認可が必要である。また、原子炉熱出力は運転制限値である。	Regulatory Guide1.70によりFSARのイントロダクションに電気出力の記載がある。また、タービン発電機関連箇所に電気出力の記載がある。	記載された電気出力は、Tech.Spec.の記載内容及び安全解析に抵触するものではなく、規制対象ではない。また、運転制限値でない。	
			50.36 (Tech.Spec)	Tech.Specに原子炉熱出力 MWt との記載がある。				なし
			50.57 (運転認可の発行)	運転認可書に原子炉熱出力 MWt との記載がある。				なし
仏	原子炉安全 規制	Décret n 63-1228 du 11 Decembre, 1963 (1963年12月11日の政令第63-1228号)	第3条 第4条 第6条	Autorisation Décret (設置許可書に相当)に万kWの熱出力との記載がある。	原子炉熱出力は規制対象であり、変更する場合は認可が必要である。また、原子炉熱出力は運転制限値である。	Autorisation Décret (設置許可書に相当)に約万kWeの電気出力相当との記載がある。	記載された電気出力は、運転制限値となっていない。	
独	原子炉安全 規制	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (原子力の平和利用及びその危険の防護に関する法律)	第7条 (施設の許可)	運転許可書に 原子炉熱出力 MW との記載がある。	原子炉熱出力は規制対象であり、変更する場合は認可が必要である。また、原子炉熱出力は運転制限値である。	なし	なし	
日本	電気事業 規制	電気事業法	9条 (電気工作物等の変更)			電気工作物変更届出書等に発電所の新設、増設時及び申請した出力を改造等に伴い変更する場合には、届出が必要である。	届出された電気出力は最大出力とされている。	
	電気保安 規制 原子炉安全 規制	電気事業法	42条 (保安規程)	なし	原子炉熱出力は規制対象であり、変更する場合は認可が必要である。また、そのために行う工事については認可が必要である。	なし	記載された電気出力は上記の届出値である。5%以上の出力の変更を伴う改造等は認可を必要とする。	
			47条 (工事計画)	原子炉本体 熱出力 MW との記載がある。		工事計画認可申請書に 発電所の出力 kW (第 号発電設備 kW) 蒸気タービン出力 約 kW との記載がある。	また、運転制限値とする規制上の要請が平成7年の法改正によりなくなったが、引き続き、電気事業者は自主的に運転制限値としている。	
		原子炉等規制法	23,26条 (設置の許可、変更の許可及び届出等)	原子炉の熱出力 約 MW との記載がある。		また、原子炉熱出力は運転制限値である。	設置許可 (変更) 申請書に蒸気タービン出力 約 kW との記載がある。	記載された電気出力は、運転制限値となっていない。
		37条 (保安規定)	モード1 (出力領域中性子束指示値5%超)の運転状態において原子炉熱出力 MW以下であることとの記載がある。		なし			