

環境省請負調査業務

平成 2 2 年度国内外における発電所等からの
温排水による環境影響に係る調査業務
報告書

平成 2 3 年 3 月

財団法人 海洋生物環境研究所

日本エヌ・ユー・エス株式会社

まえがき

本報告書は、環境省請負調査業務である「平成 22 年度国内外における発電所等からの温排水による環境影響に係る既存知見」をとりまとめたものである。

わが国における火力発電所や原子力発電所等の設置工事にあたっては、法令や条例に基づき適切な環境影響評価手続きが行われているが、発電所の稼働にともなって排水される温排水による環境への影響を懸念する声の一部からあがっている。そのため、火力発電所や原子力発電所から放水される温排水に関する法規や温排水の環境影響について、現状の知見を収集・整理し、わかりやすい情報として取りまとめることとなった。

本調査では、国内外の公表された文献等を収集し、温排水に係わる規制や環境影響、環境保全対策等に関する知見を整理した。さらに、国内外の関係機関（規制当局、電気事業者）、また海域環境や海生生物分野等の専門家にヒアリングを行い知見の補完充実を図った。国外における知見収集は、アメリカとフランスを中心とした欧州連合（EU）を対象とした。また、本事業の実施に当たっては、検討委員会を開催し計画案と調査結果について審議いただき、報告内容の充実に努めた。

本事業の実施にあたり貴重なご助言や情報提供等、多大なご協力をたまわった検討委員会委員、関連規制当局、電気事業者、および専門家等の皆さまに心より感謝申し上げます。

財団法人 海洋生物環境研究所
日本エヌ・ユー・エス株式会社

目 次

まえがき

I. 調査目的	1
II. 実施体制と検討会	1
III. 業務内容	1
IV. 調査結果	2
1. 温排水の管理、規制等の実態	2
(1) 取放水間の水温上昇幅 (ΔT)	3
(2) 温排水量	5
(3) 取水流速	5
(4) 取放水方式	5
2. 温排水影響の予測評価手続き	7
3. 温排水による沿岸環境の変化	7
(1) 発電所周辺水域の水温上昇	8
(2) 取放水流動による海水の移動	9
(3) その他の影響	9
4. 温排水の海生生物影響	10
(1) 取水影響	10
(2) 放水影響	12
(3) 塩素影響	13
5. 環境保全への配慮・対策	15
(1) 環境保全上からみた発電所運用条件	15
(2) 環境保全措置	15
(3) モニタリング調査・事後調査等の実施状況	17
6. まとめ	17
引用文献	22
参考1.本文中に引用したウェブサイト	25
参考2.本文中に引用した「資料」	27

I. 調査目的

本業務では、温排水に起因する環境への影響について国内外の関連知見・情報の収集、整理を行い、発電所温排水に関する最新の知見等についてとりまとめることを目的とする。

II. 実施体制と検討会

調査の実施に当たっては、学識経験者で構成される検討会を設け、調査結果および報告書の取りまとめに関する検討・評価を行った。検討会委員の名簿を以下に示す。

検討会委員

委員長

清水 誠 東京大学 名誉教授

委員

石丸 隆 (国大) 東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 教授

角湯 正剛 (財) 電力中央研究所 監事

川井 浩史 (国大) 神戸大学 自然科学系先端融合研究環

内海域環境教育研究センター長・理学部生物学科 教授

木島 明博 (国大) 東北大学大学院 農学研究科 教授

木幡 邦男 (独) 国立環境研究所 水圏環境研究領域 領域長

日野 明德 東京大学 名誉教授

事務局

(財) 海洋生物環境研究所

日本エヌ・ユー・エス (株)

III. 業務内容

1) 温排水による環境への影響事例等の収集

火力発電所、原子力発電所等の稼動に伴い発生する温排水による環境への影響について、国内及び海外（米国、EU 諸国等）における行政資料、調査・研究結果、電力会社による公表資料及びその他の資料等を通じ、温排水による環境への影響に関する知見・情報を収集・整理した。

2) 環境保全措置に係る関連知見の整理及び分析

国内外における行政資料、調査・研究結果、電力会社による公表資料及びその他の資料等を通じ、温排水に由来する環境影響に係る環境保全措置及び実施に際しての知見・情報を整理、分析した。

3) 国内外における専門家等へのヒアリング

1)、2) の調査・分析にあたっては、行政資料、調査・研究結果、電力会社による公表資料等で得られた知見を踏まえ、国内及び海外（米国、フランス）の関係者へのヒアリングを行い、文献資料等では不十分な情報について追加及び補完を行った。

4) とりまとめ

以上の知見・情報をもとに、温排水に関する法規や温排水の環境影響について、一般の方々にも理解できる、わかりやすい情報資料として取りまとめた。

IV. 調査結果*

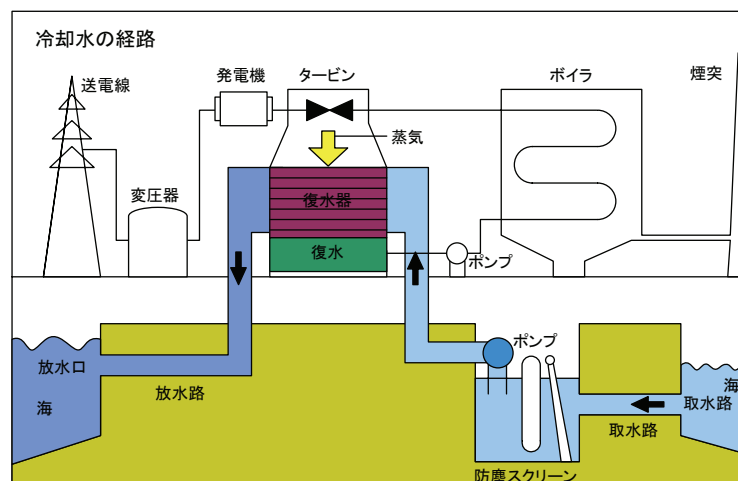
火力・原子力発電所の大容量化・集中立地に伴い、温排水（発電所冷却用水の取放水）が海生生物の再生産や漁業へ与える影響が懸念され、欧米各国、また日本でも様々な研究調査活動が実施されてきた。

わが国で温排水影響に関する調査研究が本格的に行われるようになったのは昭和 40 年代半ばからである。昭和 49 年には日本水産学会春季大会で「温排水に関する討論会」¹⁾が開催され、昭和 50 年には、温排水に関連する課題を専門的に調査研究する機関として、（財）海洋生物環境研究所（以下、海生研）が設立された。昭和 50 年 12 月には、当時の環境庁中央公害対策審議会水質部会特殊問題専門委員会温排水分科会（以下、中公審温排水分科会）において「温排水問題に関する中間報告」²⁾がとりまとめられた。以来、多数の調査研究が行われ、また、発電所においては、立地前の環境影響予測評価とともに、運転開始後も環境保全上重要な項目に関する環境監視調査（モニタリング調査）が実施されてきた。

しかし、地球温暖化や上昇傾向にある海水温などの問題とも関連し、温排水影響に対する漁業者、一般市民の懸念は未だ解消されておらず、影響予測評価のための調査研究が現在も国や電気事業者により実施されている。以下、温排水と沿岸海域環境や海生生物との係わり合い等について、これまでに得られている知見の概要を総説^{3~7)}、公表論文、単行本、国内外の行政機関や事業者のホームページ、また国内外の関連機関・専門家へのヒアリング調査から得られた情報を基にとりまとめた。国外における知見収集は、アメリカと欧州連合（EU）を対象とし、EU については臨海原子力発電所の稼働実績が多いフランスを中心に実施した。

1. 温排水の管理、規制等の実態

わが国の火力・原子力発電所のほとんどが海岸に立地し、タービン蒸気の冷却に海水を使用している。冷却に使われ海に戻される海水は、その水温が取水温度より上昇しているため、「温排水」と呼ばれる⁶⁾。なお、以下に示すわが国の発電所諸元や環境保全対策等に関する記載は、原則各発電所の環境影響評価書に基づいて記載した。右図にわが国で広く用いられているワンス・スルー方式（以下、本資料では貫流方式と表記する³⁾）の冷却水路系の概念図を示す。



発電所冷却水路系（貫流方式）の概念図⁶⁾

* 本文中で右肩に付した番号およびアルファベットは、巻末に列記した文献（数字）、ウェブサイト（大文字アルファベット）およびその他資料（小文字アルファベット）からの引用であることを示す。

参考：臨海立地

火力発電所や原子力発電所では、使用する燃料を輸入に頼っていること、また、国内では冷却に必要な多量の淡水を得ることが困難であることなどから、わが国の火力・原子力発電所のほとんどが臨海立地であり、海水を冷却水として使用している。河川水を利用している地点は石狩川から取水する2火力発電所（奈井江発電所、砂川発電所）のみである。

参考：欧米における発電所立地点

海また河川湖沼等が冷却水源とされる。臨海立地地点ではわが国と同様に貫流方式を採用し冷却用水として海水を用いている地点が多いが、内陸に立地し大量の冷却用水を確保できない地点では冷却塔などが採用されている。なお、わが国ではこれまでのところ、冷却塔方式は地熱発電所やIPP（Independent Power Producer：卸電力事業）などの比較的小規模な火力発電所で採用されている。

- ・ フランスの原子力発電ユニット 58 基の内、臨海立地（エスチュアリー域を含む）は 18 基（全て貫流方式）、内陸立地は 40 基（貫流式 10 基、冷却塔 30 基）である^{a、b)}。
- ・ アメリカの原子力発電ユニット 104 基の内、臨海立地（エスチュアリー域を含む）は 20 基（内貫流式 18 基）、内陸立地は 84 基（貫流式 40 基、冷却塔 35 基、併用システム 9 基）である^{A)}。

(1) 取放水間の水温上昇幅（ ΔT ）

タービン蒸気の冷却は発電所の中の復水器という装置（凝縮器）で行われる。タービンの効率を高めるため、復水器の蒸気圧は真空に近い低圧となるよう設計されており、その温度は 30～40℃である^{例えば、8)}。このタービン蒸気を復水器で水に戻すための冷却に海水や河川水が用いられる。

- ・ 水質汚濁防止法において、熱による水の汚染も規制の対象となっているものの、一部の自治体を除き排水の温度に関する具体的な基準・指針は定められておらず規制は行われていない。
- ・ 昭和 50 年以前に建設された発電所では取放水間の水温上昇幅（以下 ΔT ）が 7℃を超える地点もあるが、昭和 50 年 9 月の第 67 回電源開発調整審議会以降の発電所では、富山新港火力発電所 2 号機（8℃）を除き全ての地点で ΔT が 7.0℃以下に設定されている。

参考：わが国の ΔT が 7℃以下となった経緯

昭和 49 年に、柏崎刈羽原子力発電所 1 号機建設に当たって実施された、電源開発調整審議会等における環境保全に係わる論議を受けた技術検討の結果、 ΔT が事業者提案の 8.4℃から 7.0℃に変更されたことが、その後の ΔT の前例になったものと考えられる。

参考：発電所以外からの温排水

発電所以外に、鉄鋼、石油精製、石油化学等の工場・事業場からも温排水が排出される。

- ・ 中公審温排水分科会の「温排水問題に関する中間報告」²⁾ では、取放水間の水温上昇幅は、鉄鋼 5～16℃、石油精製 4～11℃、石油化学 7～25℃であり、発電所に比べると上昇幅が大

きいが排水量は比較的少なく、平均的に見ると温排水として排出される放熱量は発電に比べて少ないとしている。

参考：自治体の水温規制

一部の地方自治体では、条例などにより公共下水道への排水の最高水温または水処理センター排水の最高水温が規制されている^{B)}。

- ・ 東京都下水道局と千葉市建設局は「45℃未満または 40℃未満」、さいたま市下水道局は「45℃未満」を下水道への排水基準としている。また、川崎市は市内 4 か所の水処理センター排出水の水温は「38 度以下とし、かつ当該排水を放流する水域の水温を 10 度以上超えないもの」としている。広島県では「排出先の公共用水域に著しい変化を与えない程度」とされている。

参考：欧米における水温規制

温排水は、① ΔT と、②混合域 (mixing zone) における水温により規制される。これら規制の運用に当たっては適用除外措置 (条件緩和) がとられる場合がある。例えば、 ΔT の一時的上昇を認める (フランス、アメリカ)、混合域の面積拡大 (アメリカ) 等である^{例えば、9、c)}。

◇取放水間の ΔT

- ・ ΔT は、上記の混合域における水温規制への適合や、発電効率 (送電端出力) などを考慮し決められていると判断される。
- ・ フランスの臨海原子力発電所では ΔT は 15℃未満とされているが、900MW のユニットでは 11℃、1300MW のユニットでは 15℃で運用されている⁹⁾。電力需要増大時^{a)} または取水障害時^{b)} には、 ΔT を 21℃とすることが容認される (最大年間 20 日間)。また、冷却水路系内における水温規制はないが、放水温は 6 月～10 月は 35℃未満、11 月～5 月は 30℃未満とされている^{a、d)}。
- ・ アメリカでは連邦レベルでの水温規制は定められておらず、州による管理が行われている。臨海原子力発電所における ΔT は、州、地点により様々なケースがある (ΔT 約 7～15℃) が 9～10℃程度とする地点が多い。なお、運用上 ΔT の一時的な上昇が許容されている地点がある^{c)}。
- ・ なお、イギリスでは、火力発電所の ΔT は 10～12℃、原子力発電所の ΔT は 15℃で運用されている^{c)}。

◇混合域における温度管理

- ・ 温排水を海または河口等の自然水域に排出する地点では、混合域と呼ばれる水域が設定される。混合域とは水質基準の適用除外水域であり、国、州、地点また放水方式により異なるが、その大きさは放水口から 50～数 1,000m 程度の範囲であり、混合域端の水温 (高水温)、または混合域端における水温と周辺的环境水温との差により温度管理が行われる^{e)}。
- ・ フランスの臨海原子力発電所 (Paluel 等水中放水を採用している 3 地点) では、混合域端 (視認可能な浮上域端。放水口より 50m 程度) の最高水温が 30℃とされている^{a、d)}。
- ・ アメリカの混合域端最高水温は、北部の州では低く 80° F (約 27℃)、南部の州では高く 97° F (約 36℃) と設定されている。また、環境水温との差は州や季節により異なるが、4° F (約 2.2℃) とする場合が多い。なお、河口域等については夏季 1.5° F (約 0.8℃) とする州もある^{例えば、c)}。
- ・ なお、イギリスでは、混合域端における環境水温との差は 2℃とされ^{d)}、また、世界銀行の

ガイドラインでは3℃とされている¹⁰⁾。

(2) 温排水量

- ・ 温排水量は、出力 100 万 kW 当たり、原子力発電所で 70m³/秒程度、コンベンショナル火力発電所で 40m³/秒程度、最新鋭のガスタービンと蒸気タービンのコンバインドサイクル火力発電所で 25m³/秒程度である。
- ・ 海水取水を制限する法的な規制はないが、先に述べた石狩川から取水する火力発電所では河川流量がある一定値以下となる場合、流量の低下に応じ出力制限（取水量制限）するなどの対応がなされている。

参考：熱効率

原子力発電の熱効率は 33～35%程度であり、電気に変換されなかったエネルギーの殆どが温排水として排出される。火力発電の熱効率は約 40～60%と原子力発電より高く、また、排熱の一部はボイラーから直接大気に放出されるため、原子力発電に比べて発電量あたりの温排水量は上記のように少ない⁵⁾。

参考：欧米における温排水量

温排水量はΔT 上昇に伴い減少する。日本より ΔT が高いフランス・アメリカなどの発電出力あたりの温排水量はわが国より少ない^{b, c)}。

(3) 取水流速

- ・ 取水口における流速は 0.2～0.3m/秒の地点が多く、深層取水方式を採用した発電所では水温が高い表層水の取水を避けるため低流速(0.2m/秒程度)を採用する地点が多い。

参考：欧米における取水流速

アメリカ環境保護庁（EPA）の指針では取水流速は 1/2 フィート/秒（約 0.15m/秒）になっている^{E)}。

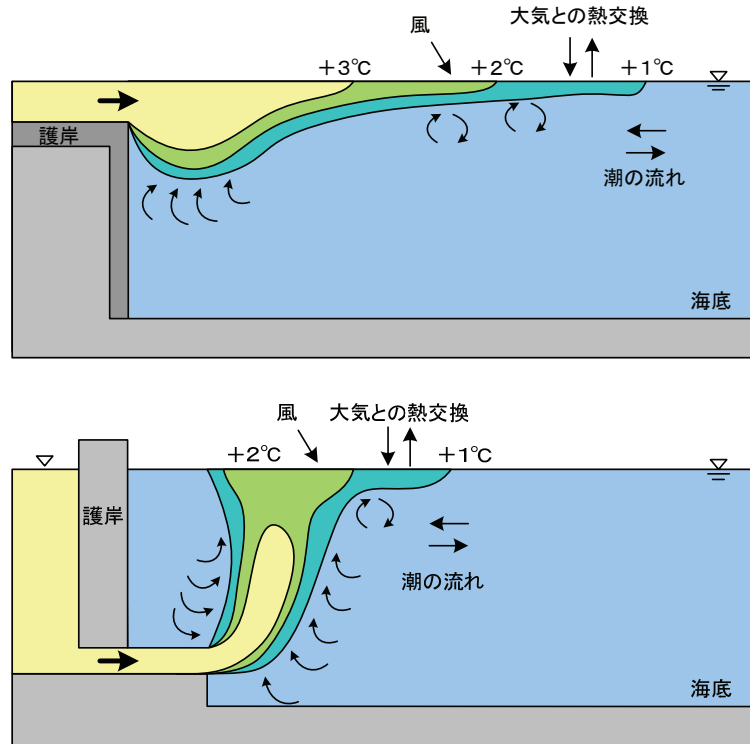
(4) 取放水方式

冷却用水の取放水方式は、取水と放水が相互に影響を及ぼさないこと、および立地点の地形、海象、生物の分布、漁業の実態などを勘案し選択される。事業者には実行可能な範囲で配慮・対策をとることが求められており、環境設計や施工にあたっては環境保全の観点からの様々な配慮がなされている。

- ・ 取水方式には、表層から取水する方式と、温排水の再循環防止や水温が低い海水の取水を目的に 5～10m 程度のやや深い水深（夏季の温度躍層以深）から取水する深層取水と呼ばれる方式とがあり、後者を採用している地点が多い。
- ・ 放水方式には、表層放水と水中放水とがある。表層放水は従来から多くの地点で採用されている方式で、表層に 1 m/秒以下の低速で放水する。表層放水された温排水は周辺の海水を巻き込みつつ海の表層を 2～4 m 層の厚さで拡散し、放水口から遠ざかるに従い、

周辺海水との混合や大気への熱拡散により水温が低下し周辺の海水温となる。

- 一方、水中放水は水中に設置した放水口から 2 ～ 5 m/秒程度の高流速で放水する方式であり、放水口近傍で周囲の海水を多量に巻き込むことにより水温を急速に低下させ、拡散範囲の縮小を図ることができる。特に原子力発電所では、近年、水中放水方式を採用する地点が多い。



表層放水（上）と水中放水（下）における温排水拡散の模式図⁶⁾を一部改変

同放水量であれば、一般に水中放水の方が表層の拡散範囲は狭くなる。

参考：欧米における取放水方式

欧米では、海域以外に湖沼や河川等も冷却水源としているが、先に述べたように臨海立地点ではわが国と同様に貫流方式の冷却システムを採用し、冷却水として海水を用いている地点が多い。貫流方式の取放水施設の基本構成（2p. の図参照）はわが国と同様である。

◇取放水施設に関する規制等

- EU では、サケ科魚保護のための取水スクリーン設置に関する指針を持つ国が多い。
- アメリカでは、連邦環境保護庁（EPA）が取水影響の軽減（取水量の減少）を図るための取水施設設計技術指針（316b 技術指針）の検討を 1970 年代より進めているが、既設地点に対する技術指針は、技術的困難さ、コスト等が問題となって現在も検討中であり、2012 年 7 月目標に指針制定のための作業が進められている^{D)}。
- 一方、近年、カリフォルニア、ニュージャージーなど一部の州では、連邦 EPA と同様の取水影響軽減（取水量減少）を目的にした既設貫流方式冷却システムの利用を制限する方針が示されている^{例えば、F)}。
- 米電気事業者は貫流方式と冷却塔などのコスト・ベネフィット比較、EPA が推奨する取水影

響軽減対策の効果確認等を実施し、連邦や州の方針の実行可能性に関する論議を進めている（例えば、G）。EPA では水生生物への影響は死亡個体数で評価し対策提案を行っているが、事業者は個体群や水産資源への影響を検討するのが適切として、この点についても議論が行われている^{G、f)}。

参考：規制の適用除外^{E)}

フランスまたアメリカでは、規制の適用除外要件が定められている。以下アメリカの例（NPDES：National Pollutant Discharge Elimination System）¹¹⁾を紹介する。

- ・ 現在の技術では排出もやむを得ないと判断される場合は、被害を最小限にする技術の導入を前提に例外として排出が許可される。
- ・ この許可は暫定許可であり、5年毎に更新手続きが必要となる。許可後は事業者によるモニタリングが実施され、その結果などを基に次の更新時に、被害の有無、新しい排出防止対策導入の可能性が検討され、同時に暫定の排出基準も見直される。NPDES 審査は専門家の意見を参考に州政府が行う。
- ・ 事業者は貫流方式の取水設備新設・許可更新に当たっては、水域への熱排出や取水方法に関する適用除外申請を行う。

2. 温排水影響の予測評価手続き

発電所の立地に当たっては事前の環境影響評価が行われる。わが国では、環境影響評価法を基本ルールとして、電気事業法で発電所固有の手続きが規定されている。

- ・ 発電所環境影響評価の考え方などは原子力安全・保安院編「発電所に係る環境影響評価の手引き」¹²⁾に示されているが、取放水温度差や取水量に関する法的な基準等はない。事業計画の環境影響予測評価結果等は、環境省、地元自治体、住民、および専門家の意見を参考に原子力安全・保安院により審査される。
- ・ 温排水（取放水）影響予測評価に当たっては、温排水の拡散予測を行い、環境水温との温度差が3、2、1℃の予測包絡線を作成し、海域環境や海生生物へ及ぼす影響予測評価の参考とする。
- ・ 昭和52年の通商産業省省議決定に基づく環境影響評価（省議アセス）では、漁業資源への影響予測評価を中心に進められてきたが、平成9年に公布された環境影響評価法や改正電気事業法に基づく現行の環境影響評価（法アセス）では、自然の生物・生態系が主な評価対象とされている。
- ・ 海域に生育・生息する生物として魚等の遊泳動物、潮間帯生物、底生生物、動植物プランクトン、卵・稚仔、海藻草類が、また、干潟、藻場、さんご礁と、重要な種及び注目すべき生息地が調査対象となっているが、地点の特性により、重点化、簡略化することが可能とされている。

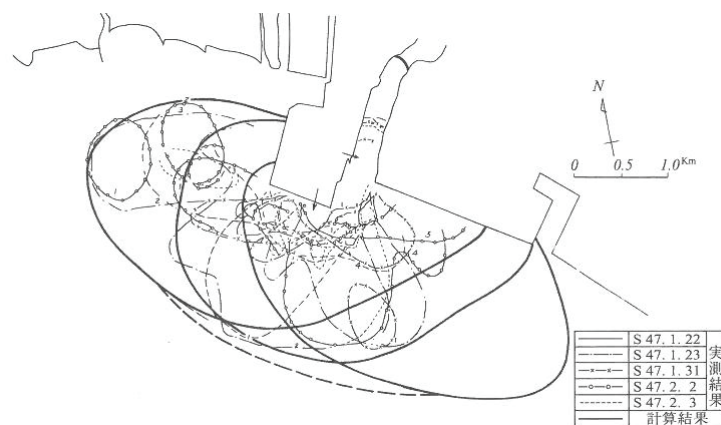
3. 温排水による沿岸環境の変化⁸⁾

温排水（取放水）による沿岸環境変化としては、発電所周辺水域の水温上昇と、取放水流動に伴う海水の移動等が挙げられる。以下、予測事例と実態を紹介する。

(1) 発電所周辺水域の水温上昇

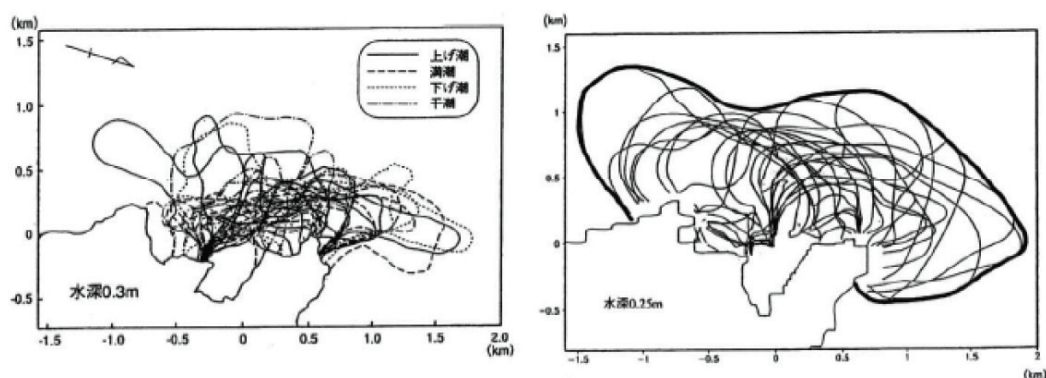
温排水の拡散予測方法は、現場海域の海象観測結果等に基づき、立地条件や温排水放水方式を考慮して適切な方法を選択することになっている。

- ・ 予測方法は、数理モデルによるシミュレーション計算と、水理模型実験による方法とに大別される。表層放水方式の場合は主にシミュレーション計算が用いられる。水中方式の場合は水理模型実験が有効とされるが、拡散範囲が広域になる場合は数理モデル計算を併用する¹²⁾。近年は3次元数理モデルによる水中拡散予測モデルが開発され¹³⁾、温排水拡散予測に適用されているが、二次元数理モデルに較べるとまだ適用事例が少ない。
- ・ 拡散予測では、一般に拡散範囲が広がる海象・気象条件下で周辺の海水温よりも3、2、1℃上昇する範囲が予測される。
- ・ 実際の海での拡散状況は、温排水量、放水方式、地形条件、気象条件、潮汐や沿岸流などの影響を受け時空間的に変化するので、予測手法である数理モデル計算・模型実験はこれらの条件を考慮して開発されており^{14~18)}、その再現性や適合性は現地観測結果との比較により確認されている^{14、19、20)}。運転開始後のモニタリング調査その他により観測された水温上昇範囲のほとんどは、数理モデル計算・模型実験による予測の範囲内に収まっている(例えば、8、21、22)。温排水2次元拡散モデルに関する検討事例⁸⁾、3次元拡散モデルに関する検討事例²⁰⁾を下図に示す。



水温1℃上昇範囲の実測値と計算値の比較（2次元拡散モデルの適用例）⁸⁾

内湾に立地した発電所における実測値と予測計算の比較。点線・破線が実測結果、太実線が計算結果、太実線の外縁と太破線が $\Delta T 1^\circ\text{C}$ の包絡線（様々な条件で計算または実験し得られた拡散結果を包絡する範囲）である。図に示すように実測値のほとんどが予測の範囲に収まっている。



水温 1℃上昇範囲の実測値と計算値の比較（3次元モデルの適用例）²⁰⁾

表層放水と水中放水の双方を実施している外海に面する発電所における実測値と予測計算の比較。左はモニタリング調査における実測値、右は計算結果とその包絡線を示す。この場合、放水口近傍域における拡散を3次元モデルにより計算し、やや離れた水域における拡散は2次元モデルにより計算している。図に示すように調査結果は予測の範囲内に収まっている。

(2) 取放水流動による海水の移動

取放水に伴い取水域の海水が放水域に移送される。また、取放水流により発電所周辺海域の海水流動・交換が促進される²³⁾。これらにより取水域、放水域の水質が変化する可能性がある。

- ・ 東京湾に立地する11発電所の温排水量が現状より30%増加した場合をシミュレーションモデルにより計算した事例がある。この結果によると、湾域全体における海水温、水質にはほとんど変化がなかった^{24、25)}と報告されている。
- ・ 小規模の湾（福井県の浦底湾や丹生湾など）では、発電所の取放水により外洋水が流入し、網生け簀養殖が可能となる程度まで水質が改善されたと報告されている^{26～28)}。
- ・ 深層取水方式では、夏季、底層の貧酸素海水が取水され放水域に拡散すること等が懸念されているが、大阪湾奥を対象にした実態調査とシミュレーション計算では、放水口近傍（数100m以内）で周辺海水との混合により生物に影響のない溶存酸素量レベルまで回復したこと²⁹⁾、また、放水流動（表層放水）により放水口近傍底層の貧酸素環境が改善した場合があること³⁰⁾が報告されている。

(3) その他の影響

- ・ 漁業活動への影響事例としては、これまでのところ放水域における「うるみ現象」が報告されている。

参考：うるみ現象

上下層の間の水温差によって発生する陽炎に似た「うるみ現象」が、日本海側に立地する1原子力発電所拡散域で発生し、放水口近傍域における箱メガネによるカナギ漁（アワビ漁）の障害となった⁵⁾。この発電所には2基の発電ユニットがあるが、1ユニットについては表層放水から

水中放水方式に変更して以降放水口近傍でのうるみ現象は観測されなくなった^{3 1)}。

- ・ その他、放水流動により、放水域における船舶航行障害、発泡現象、海底洗掘などが発生することがあり、それぞれ軽減対策がとられている。

参考：軽減対策

- ・ 放水流速は温排水の希釈拡散のためには、高速で放出する方が有利であるが、特に内海・内湾域では船舶の航行障害が想定されるため、放水流速を小さくする措置がとられている。水中放水は噴流による混合希釈効果を活用するため表層放水よりも早い流速で放水されるが、この場合でも浮上点での流速が問題にならないよう設計されている^{3 2)}。
- ・ 放水の過程で空気を取り込みやすい表層放水方式で泡が発生する場合がある。この泡自体には有害性はないが、景観上の問題として消泡対策がなされる。対策としては、放水路の構造に空気を入りにくくし泡の発生量を小さくする、放水口に泡を消すための構造物を設置する、海水のシャワーにより泡を消すなどがある^{3 3)}。
- ・ また、水中放水方式では海底の洗掘および底土の巻き上げが懸念されるため、放水口周辺に張り石などの保全対策がとられる^{3 4)、3 5)}。

4. 温排水の海生生物影響

当初は水温が高い海水が放水されることによる生物や漁業への影響（放水影響）が問題視されたが、その後、海水とともに発電所内に取り込まれたプランクトン・魚卵・仔稚魚などが発電所内の海水配管系を通過する時に受ける影響（取水影響）についても懸念されるようになった。

昭和 50 年の中公審温排水分科会「温排水問題に関する中間報告」²⁾では、「温排水の排出されている排水路並びにその排出に伴い常時 2～3℃以上昇温している水域の範囲で生物相が変化したり、その種類数が減少したりする現象が見られることもあるものの、この水域を外れると生物相の顕著な変化は知られていない。ただ、のり等については、1℃の昇温により影響が見られることもある」ことから「自然環境水温（温排水の排出地先水域のなかで、当該温排水の影響を受ける水域以外の水域における表面水温をいう。）が一定温度以上（例えば、2～3℃以上）上昇する水域の範囲に、重要な藻場、魚礁、産卵場、稚仔の生育場、海中公園地区、天然記念物生息水域等が含まれる場合には水産資源の保護、文化財等の保存に悪影響が及ぶことが予想される。また、温排水の排出先が海峡、湾口、河口及び河川の場合には、これらの水域を通過又は溯上、降河する魚類の遊泳が温排水により阻害されることがある」と予想されている。

これらの懸念を解明するため、これまでに、国や自治体の研究機関、電力会社、(財)電力中央研究所、また海生研などにより数多くの調査研究、対策技術の開発が行われてきた。

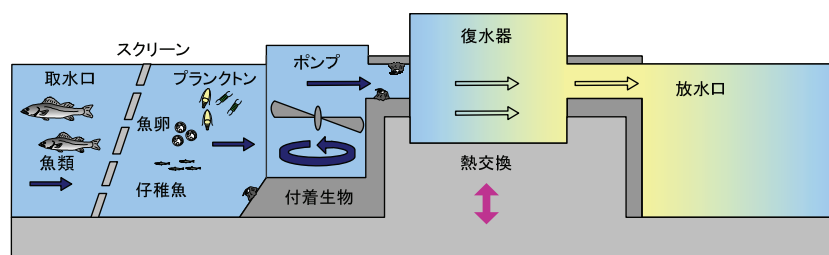
以下、法アセスの考え方に従って海生生物影響の予測評価に係わる調査研究の概要を紹介する。

(1) 取水影響

遊泳力がある大きな魚類が取水とともに発電所に取り込まれることはないが、取水口付

近に分布する浮遊性の動植物プランクトンや魚卵、遊泳力が小さな仔稚魚・幼魚、無脊椎動物の幼生などは、海水とともに発電所内に取り込まれることがある。動植物プランクトン、魚卵・仔稚魚や幼生は発電所内の配管を海水とともに通過するうちに、水温上昇、流れの乱れ、配管壁面への接触、生物付着防止策などの影響を受けると考えられる³⁶⁾。また、取り込まれた幼魚は発電所内への漂流物流入を防ぐ除塵スクリーン（メッシュサイズ約1 cm）などに衝突・捕捉される可能性がある。

これら影響を解明するために、種々の室内実験や^{37~40)}、日本各地の発電所取水口・放水口、周辺海域における動植物プランクトンや魚卵の生残率・分布調査などが行われた。また、取り込まれた量と周辺に分布・生息する量との比較（資源量影響に関する検討）が行われてきた^{36、41~43)}。



取水影響の模式図

①動植物プランクトンへの取水影響

- ・ カイアシ類（動物プランクトン）、珪藻類（植物プランクトン）、またアサリ（二枚貝）等の浮遊幼生等については、室内実験により温度耐性に関する多くの知見が得られている（例えば、37、38、44~47）。
- ・ 発電所の取水口、放水口や周辺海域において動植物プランクトンを採集し、それらの生残率や活性、密度などが調査されてきた。これらから次のようなことが分かってきた。
- ・ 水路系通過中の動植物プランクトン死亡率（活性の低下率）は数%程度であった³⁶⁾。また、動植物プランクトンの密度は取水口から放水口にかけて低下する場合が多いが、発電所周辺海域の動植物プランクトン現存量（存在量）には影響は認められない。冷却水路系通過中の密度低下の主要因としては、冷却水路系に付着している生物による捕食が考えられる³⁶⁾。

②魚卵・仔稚魚・幼魚等への取水影響

- ・ 室内実験により、魚卵・仔稚魚や無脊椎動物の幼生は、発生・発育段階により水温変化や機械的刺激に対する感受性が異なること（例えば、39、40）、また、動植物プランクトン（カイアシ類や珪藻類）に比べると構造的に脆弱ではあるが、現地調査により取水とともに冷却水路系に取り込まれた魚卵・仔魚のすべてが死亡するわけではないこと³⁶⁾等が明らかになっている。
- ・ 魚卵・仔稚魚については取り込み範囲の予測手法も開発されている⁴⁸⁾。また、現地調査に基づき取水取り込みやスクリーン衝突の資源影響について、スケトウダラ⁴¹⁾、カサゴ・シロサケ・イシカワシラウオ⁴²⁾、イカナゴ⁴³⁾などを対象にデータ解析が行われた。いずれの場合も発電所内に取り込まれた魚卵・仔稚魚・幼魚が全て死亡すると仮

定しても、その死亡量は周辺海域における自然死亡や漁業による減耗の数%以下と推定され、資源影響はほとんどないと判断されている^{41~43)}。

(2) 放水影響

温排水の放水による影響としては、放水口近傍域における魚類、底生生物や海藻類の出現種等の変化が報告されている。

①動植物プランクトンへの放水影響

- ・ 浦底湾や丹生湾など小規模の湾では、発電所の取放水により外洋水が流入し、外洋性種が出現するようになった^{26~28)}。
- ・ 一方、東京湾を対象としたシミュレーションモデル計算では、立地する発電所の温排水量を現状より30%増加させても植物プランクトン量はほとんど変化がなかった²⁵⁾。
- ・ 冷却水系水路内において動植物プランクトンの生残率や密度に変化が認められた場合でも、放水域や周辺海域の現存量（存在量）、出現種類相への影響は確認されていない³⁶⁾。

参考：動植物プランクトンの出現状況

海域における動植物プランクトンは、再生産周期が短いこと、海水とともに移動することなどから、種組成や現存量に時空間的変動が大きく、発電所周辺域（温排水拡散域）におけるそれらの出現状況と温排水との因果関係を明確に把握するのは、上記の小規模な湾を除くと困難な場合が多い。

②魚類への放水影響

- ・ 魚類には種特有の適水温があるため、温排水放水による魚類の逃避また生息範囲や回遊経路の変化が起こるのではないかと懸念された。そのため、多くの魚種について、選好温度や高温側の忌避温度が実験的に求められた^{49、50)}。またブリ、サケなど大型魚の忌避・選好水温に関するデータを充実するため大型生簀を用いた実験が進められている⁵¹⁾。
- ・ 漁業資源として関心の高いサケについては、超音波発信器をサケに装着させた行動調査が福島県沿岸域で実施され、産卵期、サケは表層に拡散した温排水の下を泳いで母川に到達していること、漁獲統計上、温排水の影響と考えられる変化は認められないことなどを確認した事例⁵²⁾がある。
- ・ 高温域を忌避する魚種がいる一方、放水口には、特に冬季、暖海性種を含め様々な魚種が蟄集すること⁵³⁾が知られている。また、一部の発電所の放水口近傍には釣公園が設置されている⁵⁴⁾。

③底生動物への放水影響

- ・ アワビ類³⁷⁾、アサリ⁴⁵⁾、ハマグリ³⁷⁾等の水産有用種について室内実験による発育段階別の生育適水温や限界水温の解明、また、温排水拡散域における現地調査による実態把握などが行われてきた⁵⁵⁾。
- ・ 若狭湾に立地する発電所の放水域で行われた潜水調査⁵⁵⁾によると、出現動物は、放水

口に近い調査点（放水口から 100m 程度離れた水温が約 4℃上昇する地点）で種類数の低下が認められたが、温度の直接的な影響のみではなく同時に確認された海藻類の出現相の変化（生息場の変化、次項参照）も関係していると考えられている。

- ・放水口近傍域（放水口から 500m 程度離れ水温が約 3℃上昇する水域）においては、ムラサキウニの成長促進や^{5 6)} やフジツボ類の成長促進、付着時期の長期化^{5 7)} などの変化が認められている。
- ・温排水拡散域における南方系外来種のみドリイガイの越冬・定着が懸念された。その後、拡散域（例えば、京浜運河）、非拡散域（例えば、江ノ島）の双方での越冬・定着が確認されている^{5 8)}。

④海藻類への放水影響

- ・海藻類にも種特有の生育適水温があり、また、岩礁などに固着して生活するため、特に浅海に生息する種について温排水放水の影響が懸念されてきた。そのため、アラメ・カジメ類、ホンダワラ類、コンブ類、ノリ、ワカメなど藻場構成種や水産有用種について室内実験による発育段階別の生育適水温や限界水温の解明^{5 9～6 1)}、また、温排水拡散域における現地調査による実態把握などが行われてきた^{6 1)}。
- ・ノリは最も温度感受性が高い海藻のひとつである^{6 2)}。実際の発電所の温排水を使って冬季に行われたスサビノリの培養実験^{6 3、6 4)} によると、同種の適水温は 10～17℃であり、この範囲であれば水温上昇に起因する成長速度や品質への影響は認められず、また、適水温の上限付近でも適度な海水流動があれば水温影響を軽減できる可能性がある。
- ・現地調査からは、温排水に常に覆われる放水口極近傍で大型海藻の生育や種組成に変化があることが報告されている^{6 1、6 5)}。例えば、若狭湾に立地する発電所の放水域で行われた潜水調査^{6 1)} では、温排水と常時接触する水温上昇幅 3～5℃（放水口から概ね 300m 以内）の浅海域では、特に夏季に海藻群落の構成種が変化し一年生の小型海藻が優占することが確認されている。
- ・対馬暖流域に立地する原子力発電所周辺海域における現地調査から、大型の海藻アラメは 8 月の月間平均水温が 28℃（概ね 2℃上昇域に相当）以上となる海域では生育していないことが確認された^{5 1)}。
- ・近年の海水温上昇が南方性藻食魚類の北上等による摂餌圧の増加をまねき、藻場を衰退させることが懸念されており、温排水がこれを助長する可能性が指摘されているが、既存知見が少ないことから、現在現地調査と室内実験による解明が進められている^{5 1)}。

(3) 塩素影響

冷却水路系に、微生物やムラサキイガイ、フジツボ等の生物が付着すると復水器における熱伝達効率の低下、ポンプ負荷の増大、また時には水路管壁の損傷などが発生する可能性があるため、生物付着防止対策は発電所の円滑な運用を図る上で重要な課題となっている。発電所においては、水路・管路壁面の洗浄、また、塩素（海水電解液）など薬剤や防汚塗料による生物付着の除去・防止が図られている。

参考：防汚塗料

- ・亜酸化銅系塗料、シリコン系塗料などが用いられている。亜酸化銅系塗料は塗膜から溶出す

る銅イオンが付着生物の幼生に作用するものであり、シリコン系塗料は塗膜のはっ水性により生物の付着を阻害し付着を防止するものである。

- ・ シリコン系塗装は環境影響がより小さいと考えられるが、定期的な塗り替えに伴うコスト高が課題となっている。

①塩素処理の運用状況

- ・ 火力発電ユニットの40%程度、原子力発電ユニットの一部で塩素処理が行われ^{6 6)}、主に海水電解液を冷却用海水に注入する方法が採用されている。
- ・ 水産用水の条件として「残留塩素（残留オキシダント）が検出されないこと」^{6 7)}とされていることなどから、発電所放水口においては一般に残留塩素が検出限界値（オルトトリジン法 0.01mg/L または DPD 法 0.05mg/L）未満となるように注入量が管理（低濃度・連続注入）されている。

参考：欧米における塩素処理の運用状況

- ・ フランスをはじめ EU 諸国、またアメリカにおいて貫流方式を採用している発電所の多くで塩素処理が採用されている^{6 8)}。わが国では塩素（海水電解液）の低濃度・連続注入が一般的であるが、欧米では高濃度で注入時期や時間を絞った塩素注入方式も採用されている。
- ・ フランスの臨海原子力発電所では、放水路端や混合域端の残留塩素濃度 0.3～0.5mg/L で運用されている^{d)}。また、EU 内には放水口で 0.1mg/L 未満とする事例もある^{6 8)}。
- ・ アメリカにおいては、遊離塩素、残留塩素の最大許容値が各々0.5mg/L、0.2mg/L、注入は2時間/日で運用されている。環境水中の濃度規制はないが、この点について NPDES 申請時に影響評価を行うこととなっている^{e)}。
- ・ 世界銀行のガイドラインでは、残留塩素濃度は 0.2mg/L とされている^{6 9)}。

②塩素の影響

- ・ 海水の電解液注入（塩素注入）により、海水中では残留オキシダントが生成され、このオキシダントが付着生物幼生の付着阻害や成長阻害に効果を示す。
- ・ 塩素の毒性に関する多くの室内実験の結果を基に、塩素に関する水産用水基準は「残留塩素（残留オキシダント）が検出されないこと」とされている^{6 7)}。
- ・ わが国の複数の発電所における現地調査では、塩素注入により動物プランクトンでは生残率が数%低下し、植物プランクトンでは活性が約30%低下したが、発電所前面海域のプランクトン現存量（存在量）には影響が見られなかった^{3 6)}。

参考：欧米における塩素影響の検討事例

- ・ 海産動植物プランクトン、藻類、無脊椎動物、魚類などに対する残留塩素の毒性に関する既往知見を取りまとめ、海生生物に対する残留オキシダントの慢性影響が認められない濃度は 0.02mg/L と推定されている^{7 0)}。
- ・ 塩素注入による副生成物トリハロメタンとしては、臭素との化合物であるブロモホルムが大半を占める。わが国よりも高濃度で塩素利用を行っているフランスの発電所における実測例によると、温排水中のブロモホルム濃度は 0.003～0.019mg/L であり^{6 8、7 1)}、生物へ影響す

る濃度^{72~75)} (無影響濃度は 4.8mg/L⁷²⁾と推定されている)と比べて十分低い。なお、トリハロメタン (クロロフォルムとブロモジクロロメタン) の発がん性への懸念から、わが国の水道水では 0.1mg/L 以下が基準 (水道法に基づく水質基準に関する省令) とされている。

5. 環境保全への配慮・対策

(1) 環境保全上からみた発電所運用条件

- ・ わが国で採用地点が多い深層取水方式は温度躍層以深の海水 (夏季に表層に比べ水温が低く、また、プランクトンなどの量が少ない) を取水できるため、表層取水に比べ放水温と周辺環境水温との差の縮小や、発電所へ取り込まれるプランクトン量の減少を図ることができる。
- ・ 近年多くの原子力発電所で採用されている水中放水は、表層放水に比べ温排水拡散範囲の縮小を図ることができる。
- ・ 取放水間の水温上昇幅 (ΔT) は、わが国では現在ほとんどの発電所で 7℃以下となっている。この値は欧米諸国他の 7~15℃に比べると低い値である。なお、 ΔT を下げると温排水量は増加する。そのため ΔT が低い日本の発電出力当たりの温排水量 (取放水量) は諸外国よりも多い。
- ・ 深層取水方式を採用した発電所では、水温が高い表層水の混入を避けるため取水口における流速を 0.2m/秒程度とする地点が多い。この値は、米環境保護庁が、魚類の稚魚・幼魚などの取水スクリーンへの衝突や取水とともに発電所冷却水路内に取り込まれることを軽減するため定めている取水流速 1/2 フィート/秒 (約 0.15m/秒) とほぼ同等の値である。
- ・ 火力発電所では効率の良いコンバインドサイクル発電方式への転換が進んでいる。これにより、発電出力あたりの温排水量が減少する。

(2) 環境保全措置

法アセスによる環境影響評価手続を終了した発電所事業は 36 件 (水力発電所を除く。平成 22 年 11 月 1 日現在) で、内訳は原子力発電所 8 件 (全て貫流方式)、火力発電所 28 件 (20 貫流式、8 冷却塔) である。これら貫流方式の事業における温排水 (取放水) に関する環境保全措置を示す。なお冷却塔を設置した事業者は全て IPP である。

① 広く実施されている環境保全措置等

以下、評価書で保全措置と位置付けている場合を示す。

a. 原子力発電所における環境保全措置

原子力発電所 8 事業のうち、

- ・ 取水方式：深層取水が 4 事業、カーテンウォールが 2 事業
- ・ 放水方式：水中放水が 7 事業
- ・ ΔT (または復水器設計水温上昇値)：7℃以下 (または 7℃) が 7 事業
(注：保全措置と位置付けていない 1 事業も ΔT は 7℃以下としている)
- ・ 取水流速：約 0.2m/秒が 5 事業、約 0.3m/秒が 2 事業
(注：保全措置と位置付けていない 1 事業は約 0.25m/秒)

- ・薬剤注入：「実施しない」が3事業、「放水口残留塩素濃度を検出限界未満」が5事業。

b. 火力発電所における環境保全措置

貫流方式を採用した20事業について示す。なお、増設事業、リプレイス事業では既設取放水施設を利用する場合が多い。

- ・取水方式：深層取水が11事業、カーテンウォールが1事業
- ・放水方式：水中放水が1事業、有孔斜堤が1事業
- ・ ΔT （または復水器設計水温上昇値）：7℃以下（または7℃）が15事業
（注：保全措置と位置づけていない5事業も ΔT は7℃以下としている）
- ・取水流速：約0.16～約0.23m/秒が8事業、約0.3m/秒が1事業
- ・薬剤注入：「実施しない」が4事業。「放水口残留塩素濃度を検出限界未満」が9事業

②地点により採用された対策

- ・発電施設のリプレイスにあたって ΔT を7℃以下とする（ ΔT を低減する）（仙台火力発電所1、2号機、姫路第二発電所、坂出発電所1号）。
- ・コンバインドサイクル発電方式への転換に伴い発電出力当たりの取放水量が低減する（堺港火力発電所、姫路第二発電所、仙台火力発電所1、2号機）。
- ・温排水の放水方向を藻場、サンゴ類の分布域を避ける沖合の深場の方向とする（吉の浦火力発電所）。
- ・沖合1kmの地点から南西方向へ放水し河口への影響を低減する（川内原子力発電所3号機）。

以下参考として、法アセス以前に実施された特徴ある事例を紹介する。

- ・岩礁域藻場を避けて取水口を沿岸から離れた地点に設ける（志賀原子力発電所）
- ・岩礁域藻場を避けて放水口を沿岸から離れた地点に設ける（志賀原子力発電所、苓北発電所など）
- ・発電所周辺海域でノリ養殖が行われているため、放水位置を季節により変更する（新仙台火力発電所）

参考：アメリカで実施されている環境保全対策

アメリカにおいて1970年前後には、ターキーポイント発電所や、インディアンポイント発電所など幾つかの地点で著しい生物影響が発生する事例があったが、その後、影響評価、対策工法に関する調査研究が実施され、貫流式発電所立地にあたっては環境対策、保全措置などが取られてきている。

・ターキーポイント発電所における対策⁷⁶⁾

フロリダ州の南部（亜熱帯域）に立地するターキーポイント発電所では、1967年の運開後、1971年にかけ増設が行われた。同発電所は半閉鎖的で水深が浅いビスケーン湾（同湾域は1968年に国立モニュメント、1980年に国立公園に指定された）から取放水していたが、1968年より発電所前面海域においてリュウキュウスガモ属の海草類の枯死等が発生した。そのため、事業者、連邦政府、州政府との協議により、長い放水路（9.7km）を設置しビスケーン湾外に放水する、または、陸上に長い冷却用水路（8.4km×32本、総面積15.6km²）を設置し温

排水を循環再利用する二つの方策が検討され後者が採用された。

- ・ **インディアンポイント発電所における対策**^{77、78)}

ニューヨーク州のハドソン川に立地するインディアンポイント発電所では、1971年の2号機試運転に伴い淡水魚の迷入・衝突による死亡が発生した。連邦政府、州政府などと対策に関する協議が行われ、当初は冷却塔等の導入も検討されたが、最終的には取水スクリーンの改良、取放水流速の低減、魚類孵化場の設置、モニタリング調査が採用された。

- ・ **これまでに実施された主な環境対策・保全策の事例**^{77、79～81)}

- ・ 沖合設置等取放水口の設置位置への配慮：クリスタルリバー発電所（フロリダ州）等
- ・ 取水流速低減、取水スクリーン改良等：セーラム発電所（ニュージャージー州）、サンオノフレ発電所（カリフォルニア州）等
- ・ 代償的な環境保全措置（藻場造成、魚類ふ化場の設置、湿地等の回復）：サンオノフレ発電所（カリフォルニア州）等
- ・ 生物モニタリング：各地点

(3) モニタリング調査・事後調査等の実施状況

- ・ 省議アセス対象事業では全ての地点で建設後3カ年の環境モニタリング調査が実施されていた。また、法アセス対象事業では、予測の不確実性の程度が大きい選定項目について環境保全措置を講ずる場合、また、代償措置を講ずる場合で効果の不確実性の程度等により必要であると認められる場合、事後調査を行うこととしている。
- ・ 法アセス実施後も、一部の地点においては水温、水質、底質、海生生物などを対象にモニタリング調査が実施されている。特に、原子力発電所においてはほとんどの地点で発電所と自治体の双方がモニタリング調査を継続して実施し、その結果が各発電所のホームページ等を通じて公表されている^{H)}。
- ・ これまでのところ、こうしたモニタリング調査などから放水口の近傍域を除くと温排水による生物影響が報告された事例はない。また、環境省が平成22年度に実施した地方公共団体を対象とする温排水の実態に関するアンケート調査においては、発電所からの温排水による被害や苦情は報告されていない。

6. まとめ

以下、本資料で紹介した温排水に関する知見の概要を示す。

(1) 温排水の管理・規制等の実態

- ・ 火力・原子力発電所では、タービン蒸気の冷却に淡水または海水を使用している。冷却に使われ自然水域に戻される淡水・海水は、その水温が取水温度より上昇しているため、「温排水」と呼ばれる
- ・ わが国では、火力発電所や原子力発電所で使用する燃料を輸入に頼っていること、また、国内では冷却に必要な豊富な淡水を得ることが困難であることなどから、国内のほとんどの発電所は臨海立地であり、海水を冷却水として使用している。温排水の量は、出力100万kW当たり、原子力発電所で70m³/秒程度、コンベンショナル火力発電所で40m³/秒程度、最新鋭のコンバインドサイクル火力発電所で25m³/秒程度である。
- ・ 欧米では、海域以外に湖沼や河川等からも取放水を行っているが、臨海立地地点ではわが国と同様に貫流方式を採用し冷却水として海水を用いている地点が多い。なお、海か

ら離れた大陸内部に立地し大量の冷却用水を確保できない火力・原子力発電所などでは、冷却塔によるタービン蒸気の冷却が行われている。

① 水温上昇幅

- ・わが国では取放水温度差 ΔT と拡散域における影響予測評価（水温上昇幅3、2、1℃包絡線を目安に実施する）により環境保全へ配慮しているが、アメリカ・フランスでは主に拡散域（混合域）における水温による管理・規制を行っている。
- ・取放水間の ΔT は、わが国では現在ほとんどの発電所で7℃以下となっているが、アメリカ、フランスでは、混合域における水温規制への適合や発電効率等を考慮し設定されている。フランスの原子力発電所では11℃または15℃で運用され、アメリカの原子力発電所では州、地点により様々なケースがある（ ΔT 7～15℃）が、9～10℃とする地点が多い。また、取水障害時など一時的な ΔT の上昇が認められる場合がある。

② 温排水量

- ・温排水量は ΔT を上げると減少する。 ΔT が高いアメリカ・フランスなどの発電出力当たりの温排水量はわが国より少ない。

③ 取水流速

- ・わが国の取水口における流速は概ね0.2～0.3m/秒となっており、深層取水方式を採用した発電所では低流速（約0.2m/秒）とする地点が多い。
- ・アメリカEPAの指針においては1/2フィート/秒（約0.15m/秒）以下とされている。

④ 塩素注入など生物付着対策

- ・わが国で、塩素注入を実施している発電所では、取水口において低濃度で注入し、放水口において残留塩素量が検出限界値（オルトトリジン法0.01mg/LまたはDPD法0.05mg/L）未満となるように注入量などが管理されている。
- ・アメリカ、またフランス他のEU諸国の臨海発電所でも塩素処理が行われている。残留塩素はアメリカでは最大0.2mg/Lで管理している。EUでは0.1mg/L未満とする事例もあるが、フランスのように0.3～0.5mg/Lとなる地点もある。

(2) 温排水影響の予測評価手続き

- ・発電所の立地に当たっては事前の環境影響評価が行われる。わが国では、環境影響評価法を基本ルールとして、電気事業法で発電所固有の手続きが規定されている。影響評価の考え方等は原子力安全・保安院編「発電所に係る環境影響評価の手引き」に示されている。
- ・影響予測評価に当たっては、温排水の拡散予測を行い、環境水温との温度差が3、2、1℃の予測包絡線を作成し、海域環境や海生生物へ及ぼす影響予測評価の参考とする。
- ・平成9年に公布された環境影響評価法や改正電気事業法に基づく現行の発電所環境影響評価（法アセス）では、自然の生物や生態系を主な評価対象としている。

(3) 温排水による沿岸環境の変化

- ・温排水（取放水）による沿岸環境変化としては、周辺水域の水温上昇と、取放水流動に伴う海水移動等が挙げられる。

①周辺水域の水温上昇

- ・ 温排水の拡散範囲の予測方法は、数値モデルによるシミュレーション計算と、水理模型実験による方法とに大別される。
- ・ 拡散予測では、一般に拡散範囲が広がる海象・気象条件下で周辺の海水温よりも3、2、1℃上昇する範囲が予測される。
- ・ 実際の海での拡散状況は、温排水量、放水方式、地形条件、気象条件、潮汐や沿岸流などの影響を受け時空間的に変化するので、予測手法である数値モデル計算・模型実験はこれらの条件を考慮して開発され、その再現性や適合性は現地調査との比較により確認されている。運転開始後のモニタリング調査その他により観測された水温上昇範囲のほとんどは、数値モデル計算・模型実験による予測の範囲内に収まっている。

②取放水流動による海水の移動

- ・ 取放水に伴い取水域の海水が放水域に移送される。また、取放水流により発電所周辺海域の海水流動・交換が促進される。
- ・ 取水域、放水域の水質が変化する可能性が指摘されているが、これまでのところ、小規模の湾等への外洋水流入以外の事例は報告されていない。

(4) 生物影響

① 取水影響

- ・ 遊泳力がある大きな魚類が取水とともに発電所に取り込まれることはないが、取水口付近に分布する浮遊性の動植物プランクトンや魚卵、遊泳力が小さな仔稚魚・幼魚、無脊椎動物の幼生などは、海水とともに発電所内に取り込まれることがある。
- ・ 水路系通過中の動植物プランクトン死亡率（活性の低下）は数%であった。また、動植物プランクトンの密度は取水口から放水口にかけて低下するケースが多いが、その主要因は冷却水路に付着する生物による捕食と考えられる。
- ・ 発電所内に取り込まれた魚卵・仔稚魚・幼魚が全て死亡すると仮定しても、その死亡量は周辺海域における自然死亡や漁業による減耗の数%以下と推定されている。

②放水影響

- ・ 動植物プランクトンへの影響は上記のとおり取放水路内で認められるものの、放水域の出現種組成や現存量（存在量）への影響は認められない。
- ・ 魚類には種特有の適水温があり、多くの魚種について、選好温度や高温側の忌避温度が実験的に求められ、拡散域の温度を魚類が忌避するか否か判断できるデータが蓄積されている。
- ・ 高温域を忌避する魚種がいる一方、放水口近傍に、特に冬季、暖海性魚種を含め様々な魚種が蟄集する。
- ・ 若狭湾等の温排水拡散域における現地調査では、放水口近傍の水温上昇幅が3℃以上となる浅海域で底生動物（潮間帯動物）の成長の変化が、水温上昇幅が2℃以上となる浅海域で大型海藻の生育や種組成の変化が確認されている。
- ・ 近年の自然海水温上昇が暖海性藻食魚類の北上と摂餌圧の増加をまねき、藻場を衰退させることが懸念されており、温排水がこれを助長する可能性が指摘されているが、知見が少ないことから現在現地調査と室内実験が進められている。

③塩素影響

- ・ 冷却水路系への生物付着防止対策に塩素（海水電解液）などが用いられる。わが国の発電所では、一般に放水口において残留塩素が検出限界値未満となるように管理されており、残留塩素濃度はアメリカ・フランス等におけるそれらより少ない。
- ・ 冷却水路系通過中の植物プランクトン死亡率（活性の低下）は塩素注入時にやや高くなるが放水域周辺海域の出現種組成や現存量（存在量）への影響は認められない。

(5) 環境監視・保全対策

- ・ 法アセスでは、予測の不確実性の程度が大きい選定項目について環境保全措置を講ずる場合等に事後調査を行うこととしている。
- ・ 一部の地点においてはモニタリング調査が実施されている。原子力発電所においてはほとんどの地点で、発電所と自治体の双方が監視モニタリング調査を定期的・長期的に実施し、その結果が公表されている。

①わが国における配慮事項・対策

- ・ わが国においては、環境保全の観点から様々な環境配慮・対策がとられている。法アセス以降の発電所環境影響評価書には配慮事項、環境保全対策として、取水・放水方式への配慮、取放水温度差 ΔT を 7°C 以下とする、取水流速を約 0.2m/秒 とする、塩素使用量の削減（放水口で検出限界未満濃度とする）等が挙げられている。
- ・ また、地点により、発電施設のリプレースにあたって ΔT を 7°C 以下とする（ ΔT を低減する）、コンバインドサイクル発電方式への転換による発電出力あたりの取放水量低減、水中放水による温排水の拡散範囲の低減、塩素注入しない、放水方向を藻場やサンゴ類の分布域避ける方向とするなどの対策が採用されている。

②欧米における配慮事項・対策

- ・ 米国においては、1970 年前後に発電所の取放水に伴うリュウキュウスガモ属の海草等への生物影響が発生する事例があったが、その後の立地にあたっては、取放水口の沖合設置、取水連行及びスクリーン衝突の回避対策、代償的な環境保全措置としての魚類ふ化場の設置・藻場造成、生物モニタリングなどの配慮・保全対策が取られてきた。

表 わが国と欧米の温排水の管理の実態の比較

	取放水温度差	取水流速	残留塩素濃度（放水口）
日本	7°C 以下	概ね $0.2\sim 0.3\text{ m/秒}$ （深層取水地点では 0.2m/秒 程度が多い）	検出限界値未満 （オルトトリジン法 0.01 mg/L またはDPD法 0.05mg/L ）
欧米	約 $7\sim 15^{\circ}\text{C}$ （仏・英・米）	0.15m/秒 以下 （米）	0.2mg/L （米） 0.1 未満 $\sim 0.5\text{mg/L}$ （EU 諸国）

- ・ 欧米諸国と比較して、わが国の取放水温度差 7°C は、同等もしくは低い値である。また、残留塩素濃度についてはわが国の方が厳しい運用管理を行っていると考えられる。

(6) 温排水による環境影響

- ・ 温排水の取水に伴う動植物プランクトンへの影響の程度については、既存の文献、調査結果等によると周辺海域の現存量（存在量）や種組成に影響を与えるものではないと報告されている。また、魚卵・仔稚魚・幼魚等への影響の程度については、周辺海域における自然死亡率等と比較して小さいものであると報告されている。
- ・ 温排水の放水に伴う生物への影響については、放水口から近傍の浅海域等で底生動物（潮間帯動物）の成長や海藻の種組成の変化、放水域への暖海性魚種等の出現等が確認された事例があるが、近年の火力・原子力発電所については、河口域や重要な藻場等の自然環境への影響を極力回避・低減するための放水方向の配慮、温排水の量や拡散範囲を低減する等の配慮がなされている。
- ・ わが国では、火力・原子力発電所の建設・運用に当たっては、多くの科学的知見などに基づく事前の環境影響評価、環境配慮・保全対策などが行われてきたことから、原子力発電所等におけるモニタリング調査や個別地点における調査研究結果において放水口の近傍（地点により 2～3℃以上の水温上昇域）を除くと温排水による環境への影響が報告された事例はこれまでのところない。また、平成 22 年度に環境省が実施した地方公共団体を対象とする温排水の実態に関するアンケート調査においても、発電所からの温排水による被害や苦情は報告されていない。

引用文献

- (1) 有賀祐勝 他 (1975). 温排水と環境問題, 恒星社厚生閣, 225pp.
- (2) 中央公害対策審議会水質部会特殊問題専門委員会温排水分科会 (1975). 温排水問題に関する中間報告, 昭和50年12月, 17pp.
- (3) (社) 日本水産資源保護協会 (1973). 水産生物と温排水, 水産研究叢書 25, 158pp.
- (4) 原 猛也・能勢健嗣 (1996). 現代の水産学, 日本水産学会編, 264-270.
- (5) 日本立地センター (2003). 発電所と温排水, 35pp.
- (6) 清野通康 (2005). 温排水と沿岸海域環境, 日本水産資源保護協会月報, 485, 3-6.
- (7) 日本機械工業連合会・海洋生物環境研究所 (2009). 平成 20 年高効率発電のための発電設備利用技術及び制約の調査報告書, 86pp.
http://www.jmf.or.jp/japanese/houkokusho/kensaku/pdf/2009/20kodoka_09.pdf
- (8) 和田 明 (2007). 海洋環境水理学, 丸善, 329pp.
- (9) 清野通康 (2004). 海生研ニュース, 84, 6-9.
- (10) World Bank Group (1998) Pollution Prevention and Abatement Handbook, 457pp.
- (11) 清野通康 (2004). 海生研ニュース, 82, 5-8.
- (12) 経済産業省原子力安全・保安院 (2007). 発電所に係る環境影響評価の手引, 平成 19 年 1 月改訂, 553pp.
- (13) 坂井伸一 他 (2004). 電中研研報, U03059. 28pp.
- (14) 和田 明 他 (1974). 電中研研報, 73011. 129pp.
- (15) 和田 明・宮池克人 (1975). 電中研研報, 74017. 48pp.
- (16) 片野尚明 他 (1980). 水理講演会, 197-202.
- (17) 坂井伸一 他 (1997). 水工学論文集, 41, 303-310.
- (18) 水鳥雅文 他 (1999). 水工学論文集, 第 43 巻, 911-916.
- (19) 和田 明 他 (1975). 第 22 海岸工学講演会, 191-196.
- (20) 坪野考樹 他 (2000). 電中研研報, U00013. 34pp.
- (21) 海生研 (1980). 冷却水の取放水環境影響評価に係る参考資料, 昭和55年 3 月環境省委託事業報告, 577pp.
- (22) 海生研 (1987). 今後の海域モニタリング調査 (温排水関係) のあり方, 昭和62年 3 月, 8pp.
- (23) 須藤静夫・高月邦夫 (1992). 海生研研報, 92302, 43pp.
- (24) 北原宏一 他 (2004). 海洋調査技術, 15(2), 1-15.
- (25) 北原宏一 他 (2004). 海洋調査技術, 16(1), 1-17.
- (26) 温水養魚開発協会 (1988). 漁業と発電所 28, 漁村, 54(8), 73-80.
- (27) 温水養魚開発協会 (1989). 漁業と発電所 42, 漁村, 55(10), 73-80.
- (28) (社) 日本水産資源保護協会 (1973). 福井県若狭海域における原子力発電所温排水環境と漁業生産におよぼす影響に関する調査報告 —浦底および美浜地先海域—, 昭和 48 年 3 月, 262pp.
- (29) 長谷川一幸 他 (2009). 海洋調査技術, 21, 1-12.
- (30) 長谷川一幸 他 (2009). 海洋開発論文集, 25, 1281-1286.
- (31) 島根県水産技術センター (2007). 島根原子力発電所温排水影響調査研究報告書 No. 27, 27-29.
- (32) 滝川真太郎・杉山陽一 (2010). 中部電力技術開発ニュース 139, 19-20.
- (33) 福原華一 (1990). 電中研研報U90021, 22pp.

- (34) 清水隆夫 他 (1994). 電中研研報 U93060, 52pp.
- (35) 牛島 省 他 (1997). 電中研研報 U97038, 34pp.
- (36) 海生研 (2004). 取水生物影響調査報告書 -平成 8~15 年度調査結果のまとめ-, 73pp.
<http://www.kaiseiken.or.jp/>
- (37) 道津光生 他 (1985). 海生研研報, 85201, 16pp.
- (38) 安楽正照 他 (1979). 日本プランクトン学会報, 26(2), 77-86.
- (39) Kiyono M. and Shinshima K. (1982). Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 49(5), 701-704.
- (40) 海生研 (1993). 海生研リーフレット, 8, 13pp.
- (41) 深滝 弘 (1983). 海生研研報, 83101, 54pp.
- (42) 水産庁研究部 (1991). 発電所の大量取水が漁業資源に及ぼす影響について, 10pp.
- (43) 横田瑞郎 (2005). 海生研研報, 8, 19-41.
- (44) 木下秀明 (1985). 海生研研報, 85203, 43pp.
- (45) 木下秀明 (1985). 海生研研報, 85204, 38pp.
- (46) 道津光生 他 (1988). 海生研研報, 88201, 23pp.
- (47) 安楽正照 他 (1978). 日本プランクトン学会報, 25(2), 93-106.
- (48) 角湯正剛 他 (1985). 第 32 回海岸工学講演会論文集, 752-756.
- (49) 土田修二 (2002). 海生研研報, 4, 11-66.
- (50) 土田修二 (2001). 電気評論, 86(12), 48-49.
- (51) (財) 海洋生物環境研究所 (2010). 創立 35 周年記念報告会講演予稿集, 45pp.
- (52) 海生研 (1988). 海生研ニュース, 19, 4-5.
- (53) 山本正之 他 (2003). 海生研研報, 5, 1-12.
- (54) 海生研 (1998). 発電所と海域環境との調和をめざして -効果事例とその特徴-, 22pp.
- (55) 太田雅隆 (1987). 日本藻類学会第 11 回大会講演要旨, 74-75.
- (56) 安田 徹 他 (1982). 水産増殖, 30(2), 106-114.
- (57) 安田 徹 他 (1982). 付着生物研究, 4(1), 1-4.
- (58) 植田育夫 他 (2001). ミドリイガイの日本定着, 日本付着生物学会編 黒装束の侵入者, 27-45.
- (59) 馬場将輔 他 (2001). 海生研研報, 3, 39-52.
- (60) 馬場将輔 他 (2007). 海生研研報, 10, 9-20.
- (61) 太田雅隆 (2002). 電気評論, 87(5), 64-66.
- (62) 片田 実 (1965). 水温と海の生物 -特に高温の影響について-, 農電普及叢書 4, 59-66.
- (63) Yamamoto M. *et al.* (1991). Nippon Suisan Gakkaishi, 57(12), 2211-2217.
- (64) 山本正之 (1992). 平成 4 年度日本水産学会近畿支部後期例会シンポジウム講演要旨, 5-6.
- (65) 堀 俊明 (1981). 水産増殖, 29(2), 88-97.
- (66) (社) 火力原子力発電技術協会 (2003). 火力発電所における海生生物対策実態調査報告書, 42-45.
- (67) (社) 日本水産資源保護協会 (2005). 水産用水基準, 64-65.
- (68) Jenner H.A. *et al.* (1998). Hydroécologie Appliquée, 10(1-2).
- (69) International Finance Corporation (2008). Environmental, Health, and Safety Guidelines for Thermal Power Plants. Dec.19, 2008, 37pp.
- (70) Mattice J.S. and Zittel H.E. (1976). J.WPCF, 48(10), 2284-2308.
- (71) 川辺允志 (2004). 日本海水学会誌, 58(4), 378-383.

- (72) (財) 化学物質評価研究機構 (2006). CERI有害性評価書トリブロモメタン (別名ブロモホルム), 東京, 20pp.
- (73) Erickson S. J. and Freeman A. E. (1978). Water Chlorination, 307-310.
- (74) Gibson C. I. *et al.* (1979). Ozone: Science and Engineering, 1, 47-54.
- (75) Taylor C. J. L. (2006). Mar. Pollut. Bull., 53(2006), 30-48.
- (76) Edward A. Laws 著, 神田穰太, 神田玲子訳 (1993). 「水環境の基礎科学」, 技報堂出版, 718pp.
- (77) NUS Corporation (1987). Major historical issues and mitigation measures related to aquatic impacts of cooling water systems of ten coastal marine power plants in the United States. 216pp.
- (78) U. S. NRC (2008). Generic environmental impact statement for license renewal of nuclear plants supplement 38 Regarding Indian Point Nuclear Generating Unit Nos. 2 and 3 Draft Report for Comment Main Report. 734pp.
- (79) Progress Energy Florida (2008). Applicant's Environmental Report - Operating License Renewal Stage Crystal River Unit 3. 461pp.
- (80) Southern California Edison (2008). Comprehensive demonstration study for Southern California Edison's San Onofre nuclear generating station. 797pp.
- (81) PSEG Nuclear LLC (2009). Applicant's Environmental Report - Operating License Renewal Stage Salem Nuclear Generating Station. 709pp.

参考 1. 本文中に引用したウェブサイト

A. アメリカ原子力規制委員会 NRC

- Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants (NUREG-1437 Vol. 1)
http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/v1/part02.html#_1_28

B. 自治体

- 東京都 : <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/osigoto/kisei/3kijyun.htm#kijun>
- 千葉市 :
http://www.city.chiba.jp/kensetsu/gesuidokanri/eigyo/tokuteishisetu_haisuikisei.html
- さいたま市 : <http://www.city.saitama.jp/www/contents/1133938312591/index.html>
- 川崎市 :
<http://www.city.kawasaki.jp/80/80suisi/home/suishitsu/pdf/haisuikijyun.pdf#search='>
- 広島県 : http://www.kanhokyo.or.jp/keieinet/1_jouhou/1140_itiritu_haisui_kijun.html

C. UK Marine SACs Info Net

<http://www.ukmarinesac.org.uk/index.htm>

D. イギリス電力会社 E.ON

- E.ON UK (2006) Proposed Replacement Coal-fired Units for Kingsnorth Power Station ENVIRONMENTAL STATEMENT,
http://www.eon-uk.com/images/Environmental_Statement_Kingsnorth.pdf

E. アメリカ連邦環境保護庁 EPA

- Cooling Water Intake Structures-CWA 316(b),
<http://water.epa.gov/lawsregs/lawguidance/cwa/316b/index.cfm>

F. 米カリフォルニア州

- State Water Resources Control Board,
http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/npdes/cwa316.shtml#otc

G. アメリカ電力研究所 EPRI

- Fish Protection at Steam Electric Power Plants - Program 54,
http://mydocs.epri.com/docs/Portfolio/PDF/2010_P054.pdf

H. わが国の原子力発電所

- 北海道 : 泊発電所環境保全監視協議会・技術部会 報告書
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/gat/kanshi/kankyomonitaringu.htm>
- 青森県 : 原子力施設環境放射線等監視評価会議 議事録と報告書
<http://www.aomori-genshiryoku.com/monitor/conference/material/index.html>

- ・宮城県：女川原子力発電所環境保全監視協議会・測定技術会 議事録
<http://www.pref.miyagi.jp/gentai/kyogi.htm>
- ・福島県温排水調査管理委員会 報告書
<http://www.pref.fukushima.jp/nuclear/anzen/onhaisui.html>
- ・新潟県原子力発電所周辺環境監視評価会議 議事録と結果概要
<http://www.pref.niigata.lg.jp/genshiryoku/1282766523391.html>
- ・石川県原子力環境安全管理協議 議事録／結果概要
<http://atom.pref.ishikawa.jp/genan/ankan.htm>
<http://atom.pref.ishikawa.jp/RS40000.htm>
- ・福井県原子力環境安全管理協議会 議事録
<http://www.atom.pref.fukui.jp/ankan/index.html>
- ・島根原子力発電所周辺環境放射線等測定技術会（環境放射線部会及び温排水部会）
 議事録／報告書／水産試験場事業報告
<http://www.pref.shimane.lg.jp/genan/anntaikyo.html>
<http://www.pref.shimane.lg.jp/genan/sihannki.html>
<http://www.pref.shimane.lg.jp/suigi/publish/jigyohou/>
- ・愛媛県：伊方原子力発電所環境安全管理委員会 議事録と結果の概要
http://etelmtsv.pref.ehime.jp/index_I.html
- ・佐賀県原子力環境安全連絡協議会 報告書
<http://saga-genshiryoku.jp/box/nenpou/index.html>
- ・鹿児島県原子力安全対策連絡協議会・海域モニタリング技術委員会 協議会議事録
http://www.pref.kagoshima.jp/infra/energy/atomic/1_2gouki/index.html

参考 2. 本文中に引用した「資料」

* 印の資料は各組織へのヒアリング調査時に説明用資料として受領したものである。

* a. フランス原子力安全機関 ASN 資料

- ・プレゼンテーション資料 Thermal Discharges of Nuclear Power Plants (Dec. 2010)

* b. フランス電力公社 EDF 資料 1

- ・プレゼンテーション資料 Thermal and chemical discharges. (Jun. 2003)

c. アメリカの州の資料

- ・Department of Environmental Protection (DEP), state of Maine. DEP Rule 06 096 Department of Environmental Protection / General, Chapter 582 Regulations relating to temperature.
- ・New Hampshire Code, Title L Water Management and Protection Chapter, 485-A Water pollution and waste disposal, Section 8 Classification of waters.
- ・Code of Massachusetts, Title 314 Division of water pollution control, Section 4.05, Classes and criteria.
- ・Connecticut Water Quality Standards.
- ・Regulations Chapter-X Division of Water, Part 704 Criteria Governing Thermal Discharges.
- ・New Jersey Administrative Code, Title 7 Environmental Protection, Chapter 9B Surface Water Quality Standards.
- ・Delaware River Basin Commission West Trenton, New Jersey, Administrative Manual – Part III WATER QUALITY REGULATIONS.
- ・Code of Maryland Regulations, Title 26: Department of the Environment, Subtitle 08: Water Pollution, Chapter 2: Water Quality, Chapter 3: Discharge Limitations.
- ・9VAC 25-260 Virginia Water Quality Standards.
- ・NC ADMINISTRATIVE CODE 15A NCAC 02B. 0220-0222.
- ・Rule 62-302. 520, Thermal Surface Water Criteria.
- ・State Water Resources Control Board, Water quality control plan for control of temperature in the coastal and interstate waters and enclosed bays and estuaries of California.

* d. フランス電力公社 EDF 資料 2

- ・JORF no.0051 (2008) texte no.7, Legifrance. gour. Fr., 3533.

* e. アメリカ連邦環境保護庁 EPA の資料

- ・プレゼンテーション資料 Meeting with the Japanese Ministry of the Environment, U.S. EPA Office of Water. (Feb. 2011)

* f. アメリカ原子力エネルギー協会 NEI 資料

- ・プレゼンテーション資料 EPA Power Plant Cooling System Regulations, NEI. (Feb. 2011)

リサイクル適正の表示：紙へリサイクル可

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料【A ランク】のみを用いて作製しています。