

# 日本の原子力施設全データ

【電子版・第2章】

北村行孝 著  
三島 勇



ブルーボックス



## 第2章 原子力発電の実際

### 原子炉の構造

発電用の原子炉は時代とともに大型化してきたが、日本で最も一般的な原子炉は、電気出力が一〇〇万キロワット級の軽水炉だ。

この原子炉はどれくらいの大きさがあるのか。沸騰水型と加圧水型でやや差があるが、原子力発電所は原子炉本体が収まった原子炉建屋、発電機の置かれたタービン建屋と補助建屋のほか、コントロール建屋などで構成されるのがふつうで、敷地面積は一万〜二万平方メートルに達する。いちばん目を引くのはやはり原子炉建屋で、建物の高さは八〇メートルほどに達し、この中に原子炉格納容器が収まっている。原子炉の放射性物質が仮に漏れても、外部に漏れ出さないように閉じ込める気密性の高い容器で、沸騰水型炉の場合、厚さ三センチメートルほどの鋼鉄板できている。

核分裂反応が起きる原子炉そのものは格納容器のほぼ中央に、円筒形の原子炉圧力容器に収ま

って、据えつけられている。压力容器は、原子炉そのものといえ、中に核燃料や核分裂反応を制御する制御棒などの重要機器が入っている（次ページの図2-11）。

代表的な沸騰水型炉である東京電力の福島第二原子力発電所2号機（電気出力110万キロワット）の場合、压力容器は高さ約22メートル、内径約6・4メートル、肉厚約16センチメートルの「低合金鋼」と呼ばれる特殊鋼でできている。

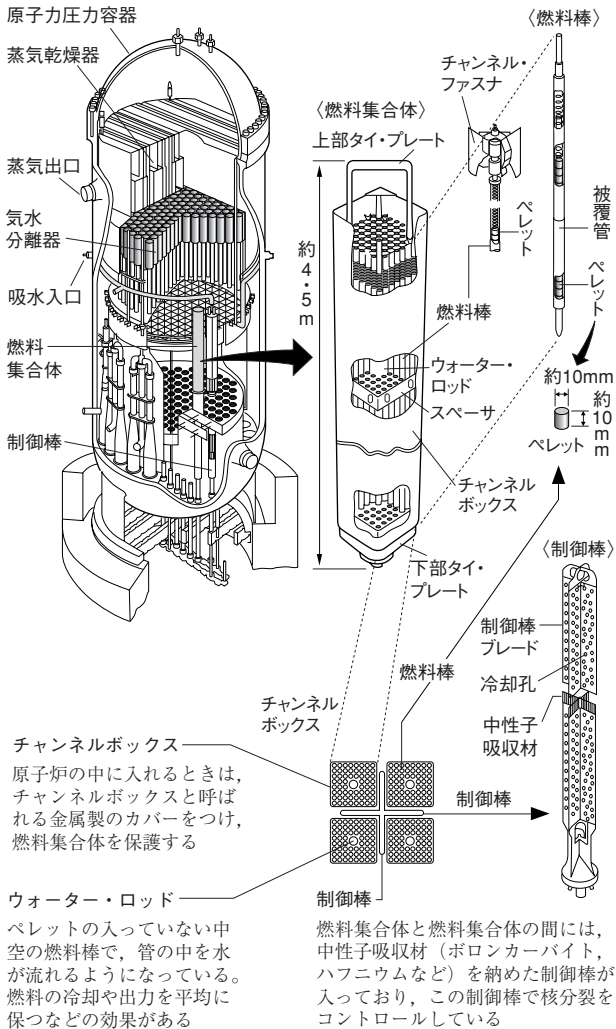
加圧水型炉の場合は、沸騰水型と比べて压力容器はコンパクトで、関西電力大飯発電所3号機（同一一八万キロワット）の压力容器は、高さ約13メートル、内径約4・4メートル、肉厚約22センチメートルとなっている。

運転時の圧力は、沸騰水型が約七〇気圧なのに対し、加圧水型では約一六〇気圧と相当に高い。また、運転時の炉内の温度は、沸騰水型が二八〇〜二九〇度、加圧水型が二九〇〜三三〇度と加圧水型のほうが高い。このため、加圧水型のほうが压力容器に丈夫さが求められる。

この压力容器内で生まれた高熱を、冷却材の水（沸騰水型の場合は高压の水蒸気）で炉外に運び出すため、压力容器には、これら冷却水の循環のための配管が何本もつながっている。

炉心の燃料は、燃料棒を何本も束ねた燃料集合体の形で収まっており（図2-11参照）、沸騰水型と加圧水型ではやはり、形状などに差がある。

加圧水型炉には、沸騰水型炉にはない大きな特徴がある。それは一次冷却系の熱を二次冷却系



2-1 原子炉（沸騰水型）の内部構造

に伝える蒸気発生器を備えている点で、標準的な蒸気発生器は高さ二〇メートル、直径四・五メートルもあり、圧力容器の大きさを上回るほどだ（次ページの図2-2）。この中に太さ二センチメートルあまりの伝熱細管が三〇〇〇本以上も収まっており、一次系から二次系に熱を伝えて、二次系の水を沸騰させる。

一方、原子炉を巡る冷却水を動かすポンプは、加圧水型では圧力容器の外に設置してあるのに対し、沸騰水型では炉心の水の流れをより正確にコントロールするために、外部のポンプのほかに「ジェットポンプ」と呼ばれる装置が、圧力容器内に収まっている。

また、燃料の燃焼状況を制御したり、炉を緊急停止したりするための制御棒も、加圧水型炉は上から燃料集合体の間に降ろす方式だが、沸騰水型炉では炉の上部の構造の特質からそのスペースがとりにくいこともあり、下から上に挿入する方式を採用しているという違いがある。

原子炉を構成するシステムは、原子炉本体、冷却系のほか、炉を思いどおりに運転するための制御系や、電気を起こすためのタービン・発電系、さらに安全系などに大きく分けられ、全体のシステムは相当に複雑だ（65ページの図2-3、66ページの図2-4参照）。

一〇〇万キロワット級原発には平均して各種ポンプが三六〇台、モーターが一三〇〇台、弁が三万台、計器類が一万個と、膨大な数の部品類が使われており、小さいものも含めて部品総数は一〇〇〇万個にも達する。

大きさ

高さ：約21m  
上部の外径：約4.5m

蒸気出口

水が蒸気（約280℃，60気圧）に姿を変えて，タービンへと向かう

二次系の水入口  
水が送り込まれる

振れ止め金具  
●逆U字型に曲がった部分の細管を支える

管支持板  
●細かい管を支える

一次系の水入口  
原子炉で熱せられた水（約320℃，157気圧）が流れ込む

細管

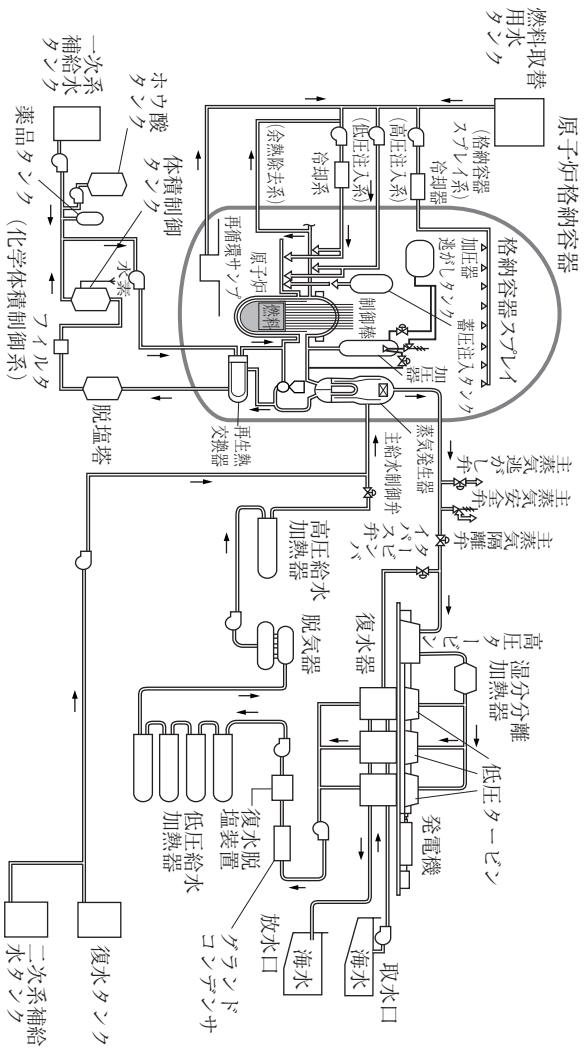
- 一次系の水（細管の中を流れる）の熱が二次系の水（細管の外を流れる）に伝わりやすくなるよう，表面積を増やすために，細かい管をたくさん（約3,400本）集めている
- 材質は腐食しにくく，強度の優れたインコネルという合金を使用しており，600気圧にも耐えることができる
- 外径約22mm，厚さ約1.3mmで長さ約20mの逆U字型になっている

管板

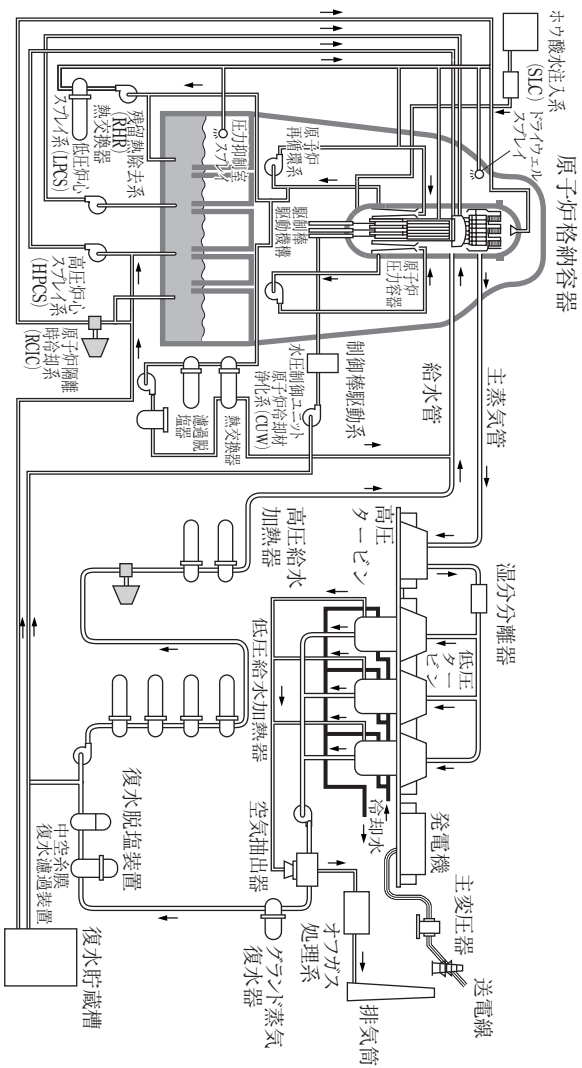
- 細管の根元を固定

一次系の水出口  
熱を伝える役目を果たした水（約290℃）が再び原子炉へ帰っていく

2-2 蒸気発生器



2-3 加圧水型炉 (PWR) のシステム



2-4 沸騰水型炉 (BWR) のシステム



また、冷却水などの大小配管の総延長が一七〇キロメートル、配管に使われている鋼材の重量が約一万吨にも達する。

★コラム⑥

原子力発電の出力

初期の原子力発電所は、比較的発電規模の小さなものが多かった。日本原子力発電の東海発電所（東海1号機）は電気出力が一六万六〇〇〇キロワット、敦賀発電所1号機は三五万七〇〇〇キロワット、東京電力の福島第一原子力発電所1号機は四六万キロワット、関西電力の美浜発電所1号機三四万キロワットなど、五〇万キロワットに達していない発電炉が多い。

その後建設されたものは次第に出力が大きくなり、一九八〇年代には一〇〇万キロワットや一〇万キロワット級の発電炉が主流になる。最も新しいタイプの沸騰水型炉である東京電力柏崎刈羽原子力発電所6号機、7号機は、それぞれ一三五万六〇〇〇キロワットで、国内では最大の電気出力となっている。

他の電源を見てみると、膨大な水量を得にくい日本の水力発電所では一カ所の発電所で数万千瓦ワットからせいぜい数十万千瓦ワット止まりのところが多い。関西電力の黒部川発電所で

も、一〇カ所の発電所を合わせた最大出力が八九万キロワットで、一カ所平均では一〇万キロワットに達していない。

石油や石炭、液化天然ガス（LNG）などを燃やす火力発電所も、以前は数十万キロワット程度の発電所が多かったが、最近では一基で一〇〇万キロワットの出力を誇る原子力発電所並みの施設も出てきた。

いずれにしても原子力発電所は、一度起動させると定格出力で定期検査の時期まで連続運転するのが経済性でも安全性の上でも有利なため、基盤電源として定常的に一定の電力を生み出す役割を担っている。昼夜によって消費電力が変わったり、季節によっても需要が変動したりするが、この変動に合わせて発電量を調整する役割は火力発電所や水力発電所が果たしている。

## 安全システム

原子炉にとって、最も重要なシステムの一つが安全システムだ。核分裂の連鎖反応の制御に失敗すると、重大な事故を招きかねないためで、さまざまな工学的な工夫がこらされている。

安全システムは多層構造が取られており、①事故につながりかねないようなトラブルの発生を事前に防止する仕組みを備えておく（異常発生防止）、②トラブルが進展して事故につながらな

いよう、異常の早期検出装置と原子炉自動停止システムを備えておく（事故の発生・拡大防止）、  
③事故が発生してしまった場合は、非常用炉心冷却装置で炉心を冷やすとともに、原子炉格納容器で放射物質を閉じ込める（放射性物質の周辺への放出防止）——の三段階からなっている。

より簡潔に表現すれば、「止める」「冷やす」「閉じ込める」の三点に要約できるが、これは原子炉に想定される事故の性質に深くかかわっている。

原子炉は複雑なシステムであるため、設計段階で、起こりうるすべての事故を考慮することはできない。このため、いくつかの典型的な事故を想定して、安全システムが設計されるが、その最も典型的な事故として考えられているのが、「冷却材喪失事故」と「反応度事故」だ。

「冷却材喪失事故」は、軽水炉の場合、冷却材の水が配管の破断などで漏出してしまい、炉心の燃料棒が露出してしまう事故だ。核分裂によって発生する膨大な熱を取り除くことができないうちに、燃料棒がちまちまち過熱してしまい、やがて高熱で溶けて、中に含まれていた高い放射能をもった核分裂生成物が炉外に出てしまいかねない。

冷却材喪失は最も恐れるべき事故の一つで、たとえこの種の事故が起きても、たいしては燃料棒の溶融にまではいたらないうちに事故は鎮圧される。ところが、米国で起きたスリーマイルアイランド（TMI）原子力発電所事故では、さまざまな不幸な事態が重なり、燃料棒のほか圧力容器の一部まで溶ける深刻な事故となった（詳細は208ページ参照）。

もう一つの「反応度事故」は「暴走事故」ともいわれ、核分裂の連鎖反応が制御できずに過剰な反応が瞬時に起きる事故だ。過去の事例としては旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所事故が有名で、爆発的な反応で原子炉そのものが壊れ、周辺ばかりか北ヨーロッパなど広範囲に放射性物質を飛散させた（詳細は210ページ参照）。

こうした事故を防ぐのに欠かせないのが、原子炉自動停止システムや非常用炉心冷却システム（ECCS：Emergency Core Cooling System）だ。軽水炉を例に、その概略を見てみよう。

原子炉の異常を知らせる兆候には、さまざまなのが考えられるが、沸騰水型炉の場合、炉心の中性子の量を測る装置が平常時よりかなり多い中性子を捉えたり、压力容器内の圧力が異常に高まっていることをセンサーが検知したりすると、制御棒が挿入されて原子炉が自動停止される。原子炉を止める信号はこれら二種だけではなく、原子炉から出てくる蒸気の放射能が異常に高かったり、格納容器の圧力が高まったときも自動停止される。これらは、燃料棒の損傷や冷却水の喪失などを疑わせる兆候だからだ。

原子炉が安全装置などによって止まることを、原子力業界では「スクラム」と呼ぶ。安全システムによる自動停止以外にも、運転員が判断して手動で原子炉を止めることも当然できる。

加圧水型炉でも、同じように炉心の中性子の状況や、冷却水が漏れたことをうかがわせる原子炉の圧力や水位の低下、一次冷却水の流量の異常などに反応して、自動停止装置が働くように設

計されている。

以上が「止める」機能で、異常事態の際に「冷やす」機能を果たすのが非常用炉心冷却システムだ。万が一にも原子炉の停止がうまくいかず、炉が過熱するなど緊急事態時に働くシステムで、冷却水の漏出を補って冷却系に水を強制的に送り込む役割を果たす。大規模な配管破断で炉心圧力が下がった場合に使う「低圧注入系」や小規模な破断で炉心圧力がまだ高い場合の「高圧注入系」など、多重システムになっており、さらに過酷な事故を想定して格納容器内を冷やす「格納容器スプレイ系」も用意されている。これは、加圧水型炉の例だが、沸騰水型炉にも、ほぼ同様の機能をもつ非常用炉心冷却システムが備えつけられている。

最後の、「閉じ込める」役割を果たすのが格納容器で、定期的な検査の際などに、その気密性が嚴重に点検される。

軽水炉を例に概略を説明したが、他の炉型でも基本的には同じような設計思想で安全システムが設計されている。

ただ、時代によって変遷もあり、草創期の原発では甘い傾向があった。また、チェルノブイリ原発（RBMK型炉＝ロシア型黒鉛炉）の事故をきっかけに、RBMK型炉の格納機能が十分でないことが問題視されたこともある。

## 立地と建設

原子力発電用の原子炉を実際に建設するためには、さまざまな手続きが必要で、最近では建設計画の初めから実際に完成するまでには、二〇年もの歳月を必要とすることが多い。火力発電など他の電源と比べて安全審査などが厳格で、これに年月を要するほか、地元の了解を得るのにも時間がかかることが多いためだ。

このため、原子力発電に取り組むためには長期的見通しと長期の資金計画が必要で、経営基盤の強い電力会社でないと手がけることができない。

日本の電力会社は長い間、地域独占が認められ経営力も強いが、米国の場合は中小の電力会社が多い。そのことが、原子力発電所の新規建設が絶えて久しい一因になっている。

日本で原子力発電所を建設する場合の流れを簡単に紹介しよう。

まず、建設用地のめどが立たなければ話ははじまらない。用地としては、冷却水を得やすい海岸近くで、地質や地盤がしっかりしており、漁業従事者などを含む地元の了解が得られやすいところとなる。

また、国の原子炉立地審査指針を満たすには、人口密集地からある程度離れていることも必要で、設計上は起こり得ないような重大事故（「仮想事故」と呼ぶ）が起きたとしても、住民に与

える放射線量が十分低いことが求められる。

欧米の内陸に立地する発電所では、大水量の河川の水を冷却水に使ったり、冷却塔を設置して空気で冷やしたりすることもあるが、大水量の河川もなく国土の狭い日本では、海沿いに建設するのが一般的だ。

立地の交渉などと並行して、建設する原子炉や付属施設の設計が進められるが、建設のめどが立つと、地元自治体の了解の上で、環境影響調査が行われる。また、その発電所の建設が、日本全体の電力供給計画から見て妥当なものかどうか、経済産業省（旧通産省）の電源開発調整審議会で検討され、ここでゴーサインが出て初めて建設計画が正式にスタートする。電源開発調整審議会が結論を出す前には、発電所建設の必要性を地元で説明して意見を聞く、経済産業省主催の「第一次公開ヒアリング」を行う必要がある。

これらの手続きがすむと、電力会社が国に原子炉設置許可申請書を提出し、国による安全審査が行われる。商用発電炉の場合は経済産業省がまず一次的な安全審査を行い、その内容を内閣府に置かれた原子力安全委員会がチェックする。この過程で、原子力安全委員会が安全上の観点から地元の意見を聞く「第二次公開ヒアリング」も行われる。

安全審査を終えてようやく着工となるが、実際に着工されると、ほぼ四年で完成する。この後、一年ほどかけて、さまざまな機能試験や国の検査、さらには起動試験を行い、営業運転に入る。

## 定期検査

原子力発電所は、完成して営業運転を開始した後も、その健全性を確認しながら運転を続けなければならぬ。

その柱となるのが「定期検査」(定検)で、国によってほぼ一年に一回行うことが義務づけられている。一年に一回といっても、国の規定では一年プラスマイナス一カ月となっているため、長ければ一三カ月の連続運転後に定期検査が行われることになる。

また、定期検査にあわせて燃料交換も行われる。交換といっても、すべての燃料集合体を一気に交換するわけではなく、三年なり四年なり炉心で燃えて古くなった燃料集合体から順次新しい燃料集合体に交換し、四回の定期検査で一巡するように燃料使用計画が組み立てられている原発が多い。

定期検査の内容は多岐にわたり、長い場合には六〇日以上かかることもあり、短くても四〇日はかかるのがふつうだ。この間、一つの原因について最盛期には一六〇〇人以上の作業員が検査関連作業に携わる。

こうした作業の際には、放射能の高い炉心などに人が近づくために、放射線防護のための特別



な防護服を着用するほか、一人あたりの作業時間も短くするなどして被曝線量を一定値以下に抑える必要がある。

また、検査用の自動機器やロボット類も開発されている。

定検の最も重要な対象である原子炉本体では、原子炉圧力容器の上蓋がはずされ、圧力容器や炉内のさまざまな構造物に亀裂などが発生していないかが検査されるほか、燃料棒が損傷していないかどうかも調べられる。制御棒の駆動装置など安全系の点検、作動確認も重要な作業だ。

原発の運転中に外部から供給されている電力が停電すると、安全制御系統が働かなくなり危険なため、どの原子炉にも複数の非常用ディーゼル発電機が備えられている。この発電機の点検や作動確認も入念に行われる。

冷却系を中心に多数のポンプや弁などが使われているが、これらも重要なものは解体点検が行われる。加圧水型炉では、蒸気発生器の伝熱細管に損傷がないかどうかを調べることも含まれている。

一九九一年二月に関西電力の美浜発電所2号機で蒸気発生器の伝熱細管が破断する事故が起きたが、この事故をきっかけに、定期検査のあり方が再検討された。

それまでの年一回の定期検査は、どのような原発でも同じように行われてきたが、運転開始から間もない新しい原発と、相当の年月がたった「熟年期」の原発では考え方を変えたほうがいい

という視点からだった。

人間にたとえれば、若い人は年一回の定期健診で十分だが、高齢者や熟年者は、たまには人間ドックに入って入念な検査を受けたほうがいいという発想だ。

運転開始三〇年が迫った原発につき、長年の運転で傷んだ機器類がないか、それらは交換可能なものかなどを総合的に点検・検討し（「定期安全レビュー」と呼ばれる）、安全な運転が続けられるような改善を行うことになった。

一九九六年に、当時の通産省が「高経年化に関する基本的な考え方」としてまとめ、これに基づいて敦賀発電所1号機（日本原電）、美浜発電所1号機（関西電力）、福島第一原子力発電所1号機（東京電力）の三基について九九年、技術評価と改善計画がまとめられた。

古い原発から順次、こうした「原発ドック入り」が行われることになっており、運転開始「三〇年」だけでなく、「四〇年」でも実施される計画だ。

※コラム⑦

原子力を巡る法律

原子力発電など、原子力開発や利用を巡る活動は、潜在的な危険性をはらんでいる。そのため、さまざまな法律でルールなどが細かく規定されている。一番の基本となるのが一九五五年に制定された「原子力基本法」で、原子力の研究や開発、利用は、「民主」「自主」「公開」の三原則のもと、平和の目的に限り、安全を旨として行うことなどを定めている。

この基本法では、原子力委員会や日本原子力研究所など、原子力に関係するさまざまな組織の目的と役割も定めており、「原子力委員会および原子力安全委員会設置法」など、各組織について設置法が制定、施行されている。

次に重要な法律として、原子力施設の安全確保のあり方などを定めた「原子炉等規制法」（核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律）や、放射線の害から国民を守るための「放射線障害防止法」（放射線同位元素等による放射線障害の防止に関する法律）がある。

実際に原子力施設を建設する場合は、「原子炉等規制法」や、それに基づく施行令、施行規則、さらに発電に関する施設については「電気事業法」の施行規則や技術基準などに基づいての安全審査や安全規制も行われる。

原子力災害が起きた際の災害対策や防災に関する「原子力災害対策特別措置法」や、賠償の

---

あり方を定めた「原子力損害賠償法」も重要な法律だ。

また、大消費地から離れた所に建設されることの多い原子力発電所などの立地を進めるために、地元の振興などを旨す「電源三法」（電源開発促進税法、電源開発促進対策特別会計法、発電用施設周辺地域整備法）もあり、実質的な電気料金の割引や交付金によるさまざまな公共施設の建設などに使われている。

---