

原子力発電所の耐震安全性を向上させる高度設計技術

より地震に強い原子力発電所の実現

近年、地球温暖化対策の有力候補の一つとして、運転時に二酸化炭素（CO₂）を排出しない原子力発電の導入が進められています。原子力発電所の安全に運轉するためには、自然災害に対しても、原子炉を安全に停止させ（「止める」）、原子炉の核燃料を冷却し（「冷やす」）、かつ放射性物質が外部に放出されないようにする（「閉じ込める」）安全機能を維持する設計が必要とされます。

わが国は、自然災害のうちでもっとも激甚な影響を及ぼす地震の世界有数の多発国であり、国内の原子力発電所は厳しい地震条件を考慮して設計されています。また、原子力発電を導入しようとしている国々の中には同様の地震多発地域が含まれており、わが国の原子力発電所の耐震設計技術に多くの期待が寄せられています。

東芝は、耐震安全性の更なる向上を目指し、耐震設計技術の開発及び高度化に取り組んでいます。

厳しい耐震安全性の要求

原子力発電所を建設する際には地震を考慮した設計が必要であり、世界有数の地震多発国であるわが国では、原子力発電所に対して厳しい耐震安全性が求められています。

2006年9月には「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂され、最新の地震学及び地震工学により得られた知見などを踏まえて見直しが行われました。具体的には、地質調査などの高度化、断層モデルの採用による地震動評価の高度化、震源を特定せず策定する地震動の考慮、及び鉛直地震動の動的評価の要求などです。これらにより、設計に用いる基準地震動

が従来に比べて大きくっており、これに対応して耐震設計された国内の原子力発電所はより安全性に優れたものになっています。

試験とシミュレーションによる高精度の耐震性予測

地震により強い原子力発電所を実現するためには、原子力発電所の建屋や機器が地震に遭遇したときに示す挙動を正しく把握し、それらの耐えられ限界を、試験やシミュレーションなどでより精度良く予測することが重要です。また、地震力^(注1)を低減するための方策

(注1) 地震によって機器などが受ける力のこと。機器の質量×地震時の機器の加速度で表される。

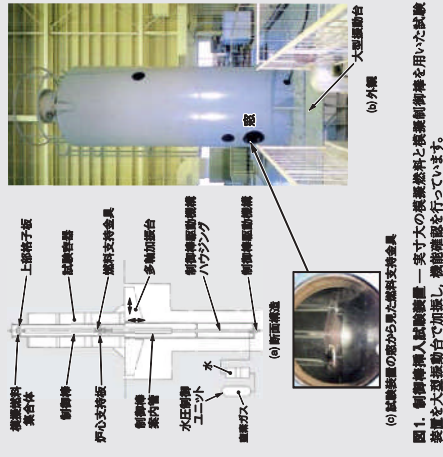


図1. 制御棒挿入試験装置—東芝の核燃料と燃焼制御棒を用いた試験装置を大型試験台で加振し、機能確認を行っています。

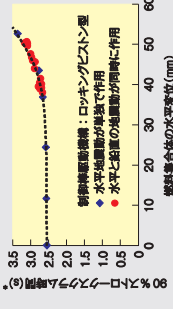


図2. 地震時のBWR炉制御棒挿入性—水平地震動に加え鉛直地震動が同時に作用した場合、燃料集合体の水平変位が挿入時間と与える影響を定量的に把握しています。

も技術開発テーマの一つです。東芝は、電力会社や独立行政法人原子力安全基盤機構と協力して、大型試験台上に搭載した実規模の試験体を、用い、「止める」機能を担う制御棒の地震時挿入性試験、「冷やす」機能を担う各種ポンプの耐震限界試験、及び「閉じ込める」機能を担う格納容器の加振試験などを実施してきました。

これらの中で、大地震に遭遇したときに原子炉を緊急停止させる制御棒の挿入機能は、安全を確保するうえで極めて重要です。制御棒の挿入性は、地震力に加え、原子炉内の圧力の影響や燃料集合体と制御棒間の摩擦などの影響を受けるため、試験による設計検証が必要です。このため、当社では、実

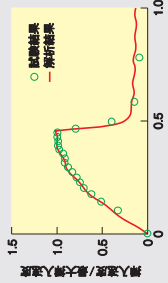


図3. PWR制御棒の挿入試験と解析の比較—地震時の制御棒の挿入挙動をシミュレーションする解析コードの検証と検証を行っています。解析コードの計算結果（解析結果）は、試験結果とよく一致しています。

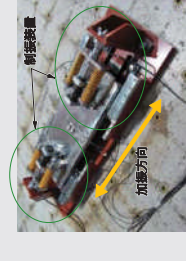
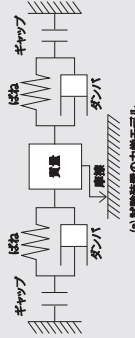


図4. 制御棒の挿入試験—制御棒を挿入することにより、従来のクレーン構造と比べて、地震時の支持荷重を大幅に低減できるとなりました。

免震・制振装置の開発

機器に作用する地震力を低減すること、より地震に強い原子力発電所の実現に有効です。

当社は、国が主導する次世代炉（PWR）では、自由落下により原子炉上部から制御棒が燃料集合体へ挿入される構造を採用しています。免震構造を原子力発電所に適用するためには、想定を超える巨大地震に遭遇した場合のリスクを考慮した免震装置の設計が求められます。このため、水平地震動と鉛直地震動が同時に作用した場合などの、免震装置の基本特性試験を進めています。燃料交換機やクレーンなどの機器は、レベル上に設置されています。このため、大地震が発生しても他の設備の

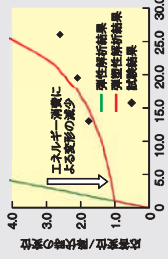


図5. エネルギーの消費による変形の減少—構造物や機器が変形する場合は、塑性変形に伴うエネルギー消費により、塑性解析による場合と比べて変形が小さくなります。

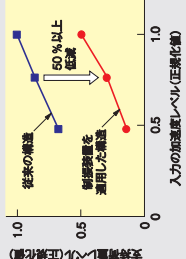
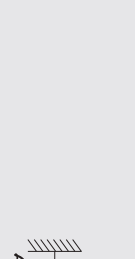


図6. 制振効果—制振装置を適用することにより、従来のクレーン構造と比べて、地震時の支持荷重を大幅に低減できるとなりました。

安全性に影響を及ぼさないよう、浮き上がりなどによる落下を防止する設計が求められます。これまでも、厳しい地震条件に対応した耐震設計により十分な耐震安全性が確保されていますが、これに加え、地震発生後から使用するなどの更に高度な要求に対応するため、当社は、クレーン構造をした機器を制振して地震の影響を低減する技術と装置を開発しています。制振効果を確認するため、制振装置を用いた試験体を作製し、加振試験を行いました。その結果、クレーン構造の地震時の支持荷重を、従来に比べて大幅に低減できるようにしました（図4）。

耐震設計の余裕の定量的把握

耐震設計の安全余裕を定量的に把握することも、より地震に強い原子力発電所を実現するための重要なテーマです。通常、機器の耐震設計では、機器を弾性体とみなして構造の健全性評価を実施しています。実際には、地震力が大きくなると塑性変形が発生し、地震のエネルギーが消費されるため、弾性体とみなした場合に比べて変形が生じにくくなり、破壊しにくくなります。このように、塑性変形によるエネルギーの消費は破壊に対する大きな安全余裕であり、これらを定量的に評価する手法を開発しています（図5）。

今後の展望

今後も、より地震に強い原子力発電所の実現に向けて、地震の影響をより精度良く評価できる技術の開発を推進し、耐震設計技術の高度化を目指していきます。

平山 浩
電力システム社
原子力事業部技術室