

# 原子力発電プラントの設計

水 町 渉\*

## 1. 原子力の現状と将来

原子力発電プラントの計画がはなばなしく取り上げられてから十数年になる。その間、原子力の分野では着実なテンポで実用化が進み、1970年の万国博の電力も敦賀原子力発電所により供給された。

今後50年の間に使用されると予想される全エネルギーは、人間の歴史始まって以来、現在までに使用した全エネルギーと同じであるといわれている。このような莫大なエネルギーを供給するためには、石油・石炭の燃焼エネルギーや、水力によるエネルギーのみではとても無理である。

このため核分裂エネルギーを利用した、原子力発電プラントが注目され、次々と建設が進められているのである。単純な計算では、ウラン燃料1gと、石炭3tの燃焼エネルギーが同じとなる。つまり、単位重量あたり、 $3 \times 10^8$  倍のエネルギーを持つということである。原子力プラントには、大きく分類すると3つの段階がある。すなわち核分裂炉・高速増殖炉・核融合炉である。現在運転されているものや、建設中ないしは多数建設が予定されているものは核分裂炉である。これはウランの核分裂時に発生するエネルギーを利用したもので、沸騰水型原子炉・加圧水型原子炉・ガス冷却型原子炉などである。高速増殖炉は“夢の原子炉”と呼ばれているもので、ウランの核分裂時のエネルギーを利用すると同時にそのとき発生する中性子から新しい核分裂性燃料プルトニウムをつくるというプラントである。現在、高速実験炉“常陽”と原形炉“もんじゅ”の建設が進められている。その後近い将来実用化が期待されている(編集部注:土木学会誌57巻2号,特集欄,参照のこと)。

今世紀末か21世紀には核融合炉が実用化されるといわれている。この場合、燃料はほぼ無尽蔵にあり、また世界中どこでも燃料が得られる。現在プラズマ状態をつくる実験が日本でも行なわれているが、いかに制御するかが大問題として残っている。核融合というのを簡単にいうと、太陽のような状態をつくることである。宇宙では、地球のように固体・液体・気体があるのはまれで、

\* M.S.E. 東京芝浦電気(株)原子力技術部

99.9%以上が、太陽のようなプラズマ状態にあるのである。プラズマを利用すれば、現在の核分裂炉のようにタービンなどを用いない直接発電が可能である。

## 2. 原子力発電プラントの安全設計

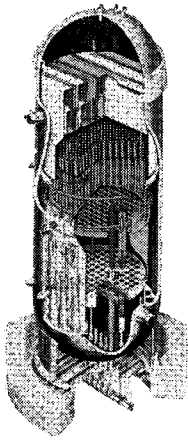
原子力発電プラントの設計に際しては、現時点における最新の技術を駆使している。設計条件としても、他のプラントでは考えられないようなきびしいものである。ここにわれわれの設計しているBWR(沸騰水型原子炉 Boiling Water Reactor)の安全設計について述べてみよう。

BWRは本質的に安全なプラントである。なぜかという、原子炉内の反応が進んで温度が上昇しても暴走することはないからである。原子炉の反応とは、中性子がウラン燃料にぶつかり、核分裂を起こすことである。この場合、中性子は十分に減速されていなければ反応は起こらない。

BWRでは水を冷却材とともに減速材として使っている。もし原子炉内で何かの異常により、急激に反応が進んで温度が上昇したとすると、炉内の水は温度が上がり沸騰する。つまり、気泡(Void)が多くなり、水が減速材として働かなくなる。したがって、中性子は減速されず、原子炉の反応はとまってしまう。

このように原子炉自体安全であるが、プラントにはいろいろな最悪の状態を仮想して、多重の安全装置を設計してある。原子炉の安全設計の基本は、異常な事態が発生しても、発電所敷地周辺の一般民衆に対し放射線災害を与えないことである。

原子炉に何か異常が発生した場合、まず炉心に制御棒(Control Rod)が挿入され、原子炉の反応は止まる。この制御棒は100本以上あり、そのおのおのは独立の系統を持っている。したがって、全部の制御棒が挿入できないということは考えられない。しかし、原子力発電所では、その考えられない状態を考えて、制御棒がまったく働かないとする。その際は原子炉を止めるための液体(Liquid Poison)も用意されている。そのほか、放射能を含んだ配管系が破断した場合にも、それが外部にもれないように、原子炉系は、大きな格納容器に包まれてい



沸騰水型原子炉

る。この格納容器内の圧力・温度が上昇した場合、これに圧力抑制槽 (Suppression Chamber) があり、これで凝縮するようになっている。

そのほかにも多くの安全装置があり、安全に係するポンプや所内用発電機その他は、必ず予備がある。また、人間が操作ミスをした場合も安全であるように設計されている。このように安全系に関する設計は十分であり、その信頼度を計算すると非常に高い値となる。

原子力発電プラントは以上のような安全設計をしており、一般の土木の考え方からすれば安全すぎる設計といえよう。

### 3. 許容応力の考え方

原子力発電プラントの許容応力については、アメリカ合衆国機械学会のコードを基準としている。日本の諸規格では、原子炉のような高圧力の容器などに対する設計基準や安全基準が明確な形で定められていないため、アメリカのコードを用いているのである。これによると、原子力プラントの運転状態を次の4つに分けている。

- ① 正常運転時：通常の運転状態にある場合
- ② 非正常運転時：正常運転時からはずれた状態であるが、運転中ときどき起こりうるもので、それにより、なんらの損傷や異常もなく、この状態に耐えられるように設計する。
- ③ 緊急状態：正常な運転状態回復のため、または損傷部の修復のため、系の運転の停止を必要とする程度にはげしい異常状態をいう。このように、はげしい異常状態が起こる確率は低いと考えられるが、設計ではこの異常状態が系全体に波及しないよう、安全性を保証しなければならない。また、このような緊急な異常状態が起こる回数は耐用期間 (一般に 40 年)、25 回を越えてはならない。
- ④ 事故状態：原子力エネルギー系に発生した事故の

影響により、系の安全性および運転能力が影響を受ける状態である。これはきわめて発生確率の低い事故の組合せによって生じるものである。

このような分類に対してのおおの許容応力が、こまかく決められている。次に大まかにこの許容応力について述べてみる。

①、②の (非) 正常運転状態に対して、圧力容器の一次膜応力は、材料の降伏強さの  $2/3$ 、または引張強さの  $1/3$  以下でなければならない。

③の緊急状態に対しては、正常運転状態の  $1.2$  倍または降伏応力の高いほうを一次膜応力の許容応力度とする。

④の事故状態に対しての一次応力の限界は、極限設計法に基づいて評価した崩壊荷重以下とする。

ここで正常運転時の一次膜応力について考えると、降伏応力に安全率を  $1.5$  とって、降伏応力の  $2/3$  としている。しかし、材料の延性および、ひずみ硬化性はさまざまであり、一様にこのように決めるのは、安全率が低くなる恐れがある。そのため許容応力としては、材料の降伏強さと引張強さの両方を考慮して定めるのが適当である。このような考えにより、許容応力強さは、降伏強さの  $2/3$  と引張強さの  $1/3$  の低いほうを用いることになっているのである。

一般に土木関係の応力を計算する場合、状況により正確に求めることはむずかしいと思われる。しかし、機械系の応力は、計算により比較的正確に求められる。その計算値に対し、以上のような安全な許容応力を用いている。そのうえ材料の加工硬化性なども考慮すれば、原子力発電プラントの設計条件は、十分に安全であるといえよう。

#### 参考文献

- 1) ASME : Boiler And Pressure Vessel Code Section III<sup>7</sup> Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, 1971.
- 2) 鶴戸口英善 : 最近の圧力容器・高圧配管の構造設計に関する技術基準とその問題点, 日本高圧力技術協会, 1970.
- 3) 水町 渉 : 原子力発電プラントの有限要素解析, 火力発電 5月号, 1972.
- 4) Mizumachi, W. : Non-Linear Thermal Stress Analysis for Nuclear Power Plant by Finite Element Method Wright Patterson AFB, Ohio, USA, 1971.
- 5) 水町 渉 : 有限要素法による原子力発電プラントの解析, 日本鋼構造協会, 1971.

## 土木工事の積算

B5・222・1800円・会員1600円 (〒170円)  
再版完成しました。

●積算概論/若木 ●工事実績と積算/山崎 ●材料および労務単価/宮内 ●機械経費と稼働率/川崎 ●仮設計画と仮設費/宮原 ●間接経費の考え方/竹内 ●安全対策費のみかた/清水 ●積算のシステム化/小寺 ●アメリカ合衆国における積算/横山