

蒸気発生器の老朽化問題

加圧水型原発（PWR）の蒸気発生器（SG）は、このシステムの最も重要な機器でありながら最も脆弱な機器である。当初原発の寿命と同じ程度、～40年の寿命は保つと考えられていた。実際には運転当初よりさまざまな損傷が発生したり、美浜2号に見られるようにギロチン破断までが起こっている。さまざまな対策が取られているにも拘らず、年月が経ち経験を積み重ねても損傷は減らず、むしろ新しいPWRが運転を開始していることを考えれば、増加しているとも考えられる。ここには老朽化の影響が現れている。老朽化は、当初に取られていた安全余裕を切り下げることになる。これでは重大な事故に十分対処できない。

PWRにおける蒸気発生器の役割は、炉心で発生した放射能と熱のうち、熱だけを2次系へ取り出すことである。放射能の閉じ込めには壁を厚くすれば良いのだが、一方では熱を効率良く取り出すことが要請されるため壁を薄くしなければならないのである。実際には、厚さ～1mm、内径～2cmの逆U字型細管の内側を炉心から送り出された高温～320℃、高圧～150気圧の水が流れ、外側に熱を伝え～280℃、～50気圧の2次冷却水からタービンを回す蒸気を発生させる。内外の圧力差が100気圧もあるので何らかの理由で穴やひび割れが生じると放射能混じりの蒸気が2次側に吹き出し、重大事故につながることもある。だからこそ、安全審査指針でも1次系と2次系の圧力境界として使用期間中の健全性の保持が特に要請されているのである。

次に蒸気発生器の使用環境、特に2次側が細管にとっていかに過酷な使用条件かを見よう。細管には、1次-2次の温度差、圧力差による熱歪みや応力だけでなく、発生した蒸気と水の混合物が高速で流れて起こる振動による応力やくり返し応力が働く。これらにより細管は、材料疲労や磨耗などさまざまな材料学的な劣悪条件下におかれる。さらに、補給水系からの不純物、2次系全体からの腐蝕生成物、復水器系統から混入の不純物などが、蒸気発生器下部の管板上にヘドロ状に堆積したり、熱流束のある細管上に濃縮されたり（dry-out）して、化学的にも強い腐蝕環境を形成している。

その結果、図1に示すように様々な原因で細管に損傷が発生して来た。一つの要因が究明されて対策が取られても、不適切な対策であったり、他の要因が現れたりして損傷は発生しつづけている。初期には化学腐蝕である減肉、70年代後半には支持板の腐蝕により細管が押しつぶされるデンティング、さらには細管厚み方向に深く進行するピitting（蝕孔）、最近では細管の内側、外側からひび割れてくる応力腐蝕割れや粒界割れ、さらに無気味なのは未知の要因が増える傾向にあることである。これは応力やくり返し応力が働いた状態で過酷な腐蝕環境の中で長年使っている間に、老朽化と合わさって細管損傷が現れていることを示唆している。老朽化が

進むにつれて予想もしない形で細管損傷が次々に起こり「圧力境界の健全性の確保」などはふっ飛んでしまっているのが実情である。

対策としては、定検ごとに渦電流探傷装置(ECT)による細管全数の検査を行い、異常の検知された細管に対しては、両端に施栓するか細管内部に細い細管で継ぎ当てをするスリーブ補修が行われる。ECT検査にも限界があるため、定検直後の運転で細管からの放射能漏れを起こすことも度々であった。運転中では1次系から2次系への放射能漏れから破損を知ることになるが、この破損が急激に進行してギロチン破断になるのか、徐々に進行するのかは全く分からないため停止せざるを得ない。我々は、既に美浜2号の場合検知した時にはギロチン破断が起こっていたという経験を持っている。図2に蒸気発生器細管に施栓した原発の割合と施栓細管の割合を各年ごとに示す。施栓細管の蒸気発生器をもつPWRは傾向として見れば徐々に増加しており、93年では調査数の半数以上56%まで増加している。76、77年に特に施栓細管が多いのは、減肉やデンディングが多発したからと考えられる。また、新しく稼動したPWRで蒸気発生器に異常がなければ全体の施栓率を下げるはずであるが、現実の数値は右肩上がりの傾向を示している。これもまた老朽化を示していると考えられる。過去10年での全細管に対する平均の細管施栓率は0.24%となるが、この値ではこれからの蒸気発生器寿命とされる30-40年では7.2%-9.4%にもなる。この値は現在の状態が続くとしてのものであるが、実際は年月と共に老朽化が進むのであるからこの値は更に大きなものになる。それに、実際には施栓だけでなくスリーブ補修もこれに加えて行われているので細管全体では異常はさらに大きくなる。施栓やスリーブ補修は、漏れや損傷があって始めて行える対処療法に過ぎず、異常や損傷を防ぐ根本的対策とは到底言えない。

ひび割れだらけの細管の恐ろしい点は、通常運転時でも複数本細管の破断の可能性のあることで、そうなれば大量の放射能が二次系を通じて環境に放出されることになる。また特に恐れられているのは一次冷却材喪失事故(LOCA)時に衝撃により細管破断が起こることで、この場合二次側から吹き込む高圧蒸気のため炉心への緊急炉心冷却装置(ECCS)による注水が妨げられ、炉心溶融につながる。推進側は、複数本破断には「想定不適當」として目をつぶり、緊急注水の妨害については、コンピュータ計算によりパラメータを操作して50%もの施栓率でも安全というビントはずれの対応しかしていない。

最近、定期検査の長期化や運転中の放射能漏れによる度重なる計画外停止による不経済に耐えかねたのか、多くの細管損傷に悩むPWRで蒸気発生器が交換され始めた。先にも述べたように蒸気発生器の寿命は原発の寿命と同じと考えられていたので、蒸気発生器を交換するような設計にはなっていない。格納容器中には十分な作業ス

ベースもないし、そのための労働者被曝や、余裕のある作業や検査が難しくなる。また、蒸気発生器搬入のため格納容器のコンクリート壁を破って新たに搬入孔を開けねばならない。いずれにしても運転開始時には予想もされなかった困難な大作業である。しかし、多くのPWRで蒸気発生器の交換が行われ、その費用は200-300億円と言われる。今やメーカー側から見れば蒸気発生器交換は大きなビジネスチャンスになっている。電力側から見ても、立地がますます困難になっている現状で老朽化に対する一つの対策という点で、メーカー側と利害が一致する。図3に蒸気発生器交換の実績を示す。93年にはNorth Anna 1, Doel 3, Bugey 5, Beznau 1, Mihama 2の五つのPWRで交換され、これ以後では28プラントで実施される計画である。

蒸気発生器細管は機能面から相反する不安定な構造を求められ、使用面からは材料学的にも物理的・化学的な過酷な腐食環境におかれている。図1に示すように細管損傷には未知のものを含めていくつものメカニズムがある。これらが老朽化と相伴って損傷をますます進行させ、安全余裕を切り下げての運転につながり、これはまた潜在的に大事故につながることになる。

(原子力安全研究グループ 川野真治)

図は()の中の雑誌から取りました。

- 図1 細管損傷の歴史 (NEI January 1995 p18, Fig 2から)
- 図2 細管施栓の歴史 (NEI January 1995 p18, Fig 1の上二つから)
- 図3 蒸気発生器交換の歴史 (NEI January 1995 p18, Fig 5から)

NEI: Nuclear Engineering International

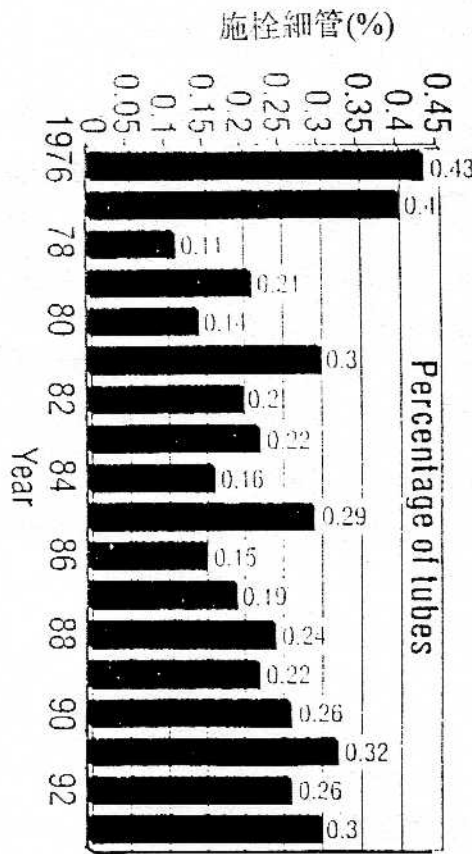
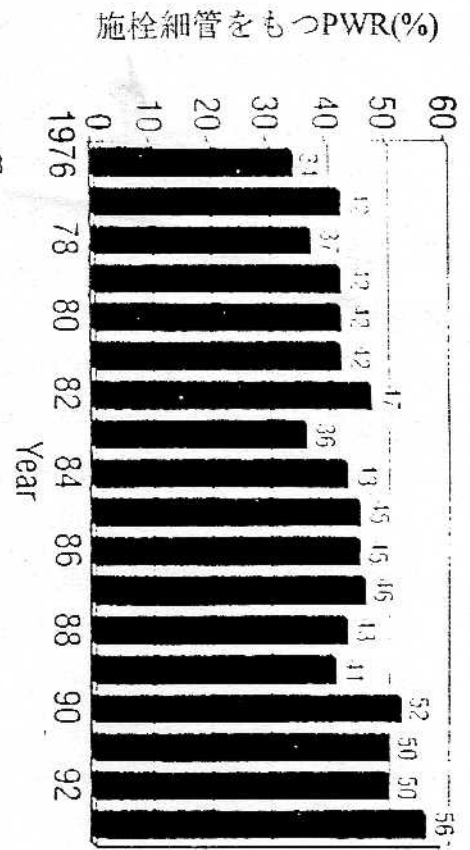


図2 細管施栓の歴史

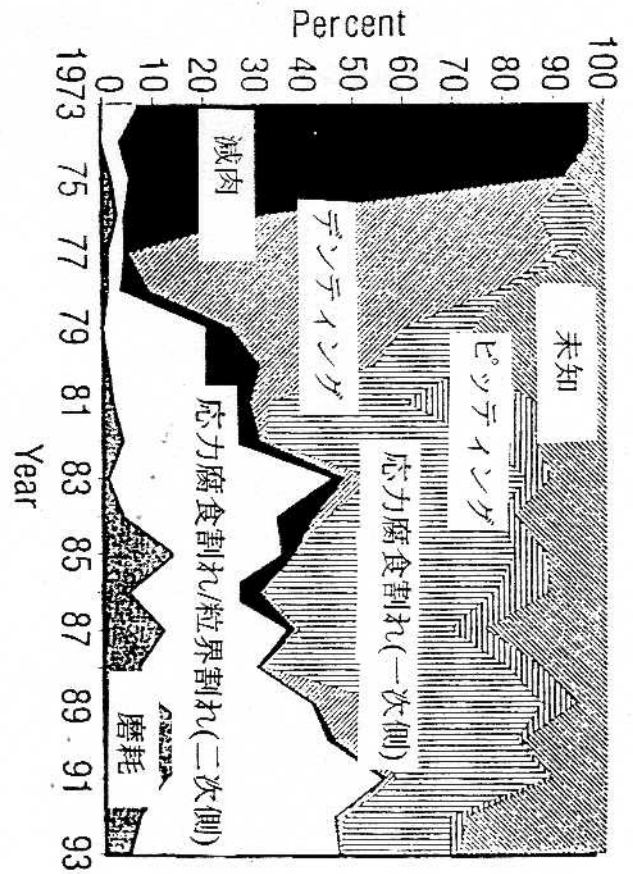


図1 細管損傷の歴史

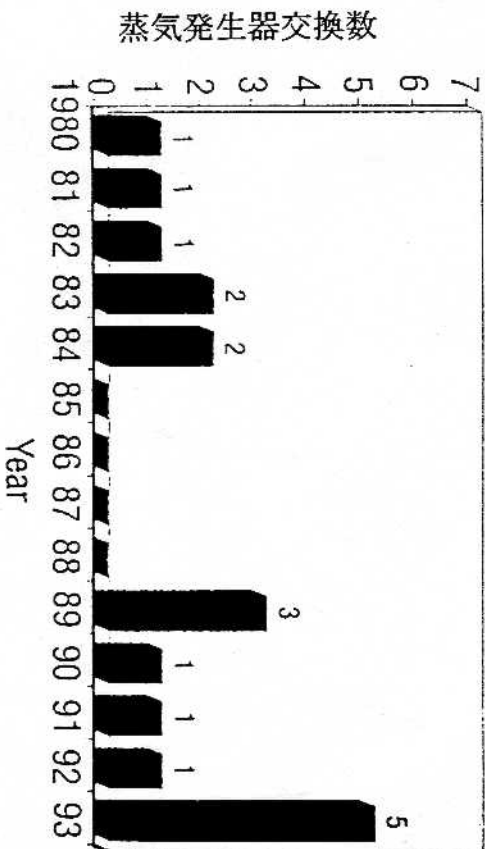


図3 蒸気発生器交換の歴史