

<概要>

PWRの蒸気発生器内に組込まれた多数の伝熱管について、1970年代に「減肉」が発見されて以来、「デンティング」、「ピitting」や「応力腐食割れ」の現象が報告されてきた。いずれの現象についても伝熱管材料と水質に関連して対策が検討され、最近では損傷の発生割合が減少してきている。これまでに損傷が発見された伝熱管にはスリーブ補修や施栓などの対策が施されるが、これまでに11基のプラントでは蒸気発生器の取替えが行われた。

2006年1月改正の技術基準（省令第62号）に流体振動等による損傷防止として美浜2号機の損傷事例が反映され、具体的な仕様規定は機械学会の「蒸気発生器伝熱管U字管部流力弾性振動防止指針」を技術評価の上、設計・建設規格2005の参照規格としている。

<更新年月>

2006年12月

<本文>

1. 蒸気発生器伝熱管損傷の状況

PWR（加圧水型発電炉）における蒸気発生器（SG:Steam Generator）の機能は、原子炉で発生し一次冷却材で運ばれてきた熱を二次冷却材に伝えて蒸気を発生することと、一次冷却材の高圧に耐えてこれを閉じこめている原子炉冷却材圧力バウンダリの一部を形成することである。図1に蒸気発生器の構造を示す。基本構造は、逆U字型の伝熱管を有する熱交換器で、管内を一次冷却材が、管外を二次冷却材が流れる構造であり、高速で流れる冷却材によって生じる振動を抑えるために、管板、管支持板および振れ止め金具によって伝熱管を支えている。

伝熱管が破損すると高圧の一次系から二次系に冷却材が漏れ出し、この量が多いと事故の拡大を防止するために原子炉緊急炉心冷却系（ECCS）が作動する事態も起きる。実用化初期のPWRでは、伝熱管の材料と冷却材の水質に起因する腐食現象により、一次系から二次系への漏れに至らないか、漏れても極めてわずかの漏洩率である微小な損傷の発生が見られた。このような損傷が発達して伝熱管の大きな破損に至らないように、PWRの定期検査においてはSGの伝熱管全数について全長にわたるECT（過電流探傷検査）を実施して、この微小な損傷を確実に検出するようにしている。損傷が発生した伝熱管に対しては、主として金属製スリーブで内張り補修（スリーブ補修）が行われるが、スリーブ補修が困難な場合には「施栓」（プラグGING）などの措置を講じる。

これまで発見された伝熱管腐食損傷と損傷部位を図2に示す。また図3に世界の蒸気発生器伝熱管の損傷原因別割合の変遷を示す。1970年代前半におけるPWR運転開始当初は、減肉現象がほとんどを占めていた。同年代後半になるとデンティング現象や、伝熱管二次側において応力腐食割れが見られるようになった。1980年代になると、伝熱管一次側における応力腐食割れやピitting（孔食）現象が報告されるようになったが、後述する各種対策により、伝熱管にピンホールが貫通するようなトラブルは激減した。また、その後の新設プラントでは設計段階、製造段階で、初期のプラントでの運転経験や海外での運転経験を参考にして種々の改善を加えてきており、伝熱管の損傷は少なくなっている。

わが国では、1970年（昭和45年）に営業運転を開始した美浜-1から、1997年に営業運転を開始した玄海-4まで、23基のPWRが稼働している（表1参照）。これまでは、1991年に美浜-2で経験したような、伝熱管に亀裂が発生して破断しECCSの作動に至った損傷事例も報告されている。表2-1、表2-2に1989年～2001年の伝熱管損傷の報告例を記す。また、1994年末ま

での、わが国のPWRにおける蒸気発生器伝熱管の損傷等と補修状況を表3に示す。

90年代前半までは、振止め金具部を除けば、損傷が発見された伝熱管は何れもTT処理（*1）を施さないインコネル600（MA600）であったが、最近では、TT600およびTT690に変更した伝熱管でも、僅かではあるが、損傷例が報告されている。

2. 伝熱管の腐食損傷の原因（発生例）と対策（図2参照）

2.1 減肉

伝熱管の減肉は、二次系水の水処理薬品としてリン酸ソーダが使用されたSGのみに発見された。各種の調査や再現実験によって、減肉の主な原因はリン酸ソーダが伝熱管と支持板の間隙部に局所的に濃縮固着されることによる伝熱管の腐食であることが判明した。伝熱管の減肉に対しては次のような対策が採用され、問題は解決された。

- ・二次系の水処理を、リン酸ソーダに代わってヒドラジンを用いる全揮発性薬品水処理（AVT：All Volatile Treatment）に変更する。

- ・水処理方法の変更に伴い、残留リン酸ソーダを除去するためSGを温水で洗浄する。

2.2 応力腐食割れ

伝熱管の製作時あるいはSGの組立て時に残留した応力に、腐食性の水環境が重畳して応力腐食割れが生じるものと判断された。この応力腐食割れは二次系側だけでなく一次系側でも発生する。二次系側では伝熱管、管板、管支持板の間隙部で発生しており、リン酸塩またはスラッジに起因するアルカリが間隙で濃縮されて起こると考えられている。このような場所の伝熱管ではピッチング現象も発生する。

伝熱管の応力腐食割れに対しては、管板部に接する伝熱管部分の拡管を、予め水圧で拡げてからローラ拡管する方法に変更して、残留応力の低減化を図っている。

また、応力腐食割れに感受性のより低い材料の開発も進められ、新設プラントに採用されている。ニッケル基合金（インコネル600）に熱処理を施したTT600合金が改良材として多用されたが、クロム量を増やして応力腐食割れ特性を改善したTT690合金が使用されつつある。また、ドイツのプラントではインコロイ800が用いられ良好な使用実績をあげている。

2.3 デンティング（denting）

デンティングは、炭素鋼製の管支持板の腐食により、伝熱管と管支持板の間にマグネタイト等の腐食生成物がつまり、管のくびれや管支持板の損傷が発生する現象である。新設プラントでは、高温水中での腐食速度が小さいSUS405が近年用いられるようになった。

3. 蒸気発生器（SG）の取替え

スリーブ補修や施栓を必要とする伝熱管の比率が高まり、それらの作業に長期間を要する場合にはSGそのものの更新が実施される。SGをより信頼性の高い最新型のものに取替えることにより、プラント全体の安全性・信頼性が一層向上することになる。わが国のPWRにおいても、TT処理が施されていないSGの一括交換が行われた。対象となった炉は関西電力の美浜1～3号機、高浜1、2号機、大飯1、2号機、九州電力の玄海1号機、四国電力の伊方1号機の合計9プラントであり、1998年1月21日～5月10日に行われた伊方1号機を取替えてこの計画は終了した。さらに予防保全の観点から、2001年に玄海2号機および伊方2号機の蒸気発生器の取替えが行われた。蒸気発生器交換を行った11プラントは、伝熱管の口径・配列・ピッチおよび振れ止め金具の本数（3本組）が同一であり、熱流動条件もほぼ同一である。

4. 伝熱管破断の事例

伝熱管が破断し、一次系から二次系への大量の漏れに至った事例のうち、近年発生した例をつぎに述べる。これらの事例では、ECCSが作動したほど大量の漏れを経験した例もあるが、サイト外での公衆被曝は許容値以下であった。

4.1 GINNA-1（米国）の事例

1982年1月25日に、SGから約2900リットル／分の漏れが発生し、ECCSが自動起動して原子炉は安全に停止した。

伝熱管破断の原因は、補修時にSG内に置き忘れた異物による磨耗減肉で施栓済の伝熱管が破断し、これが振動して周辺の健全な伝熱管と衝突し、そのうちの1本に長さ150mmに及ぶ磨耗を生じ破裂したためと報告されている。

4.2 NORTH ANNA-1（米国）の事例

1987年7月15日に、SGから約2410リットル／分の漏れが発生し、ECCSが自動起動して原子炉は安全に停止した。

伝熱管破断の原因は、振れ止め金具に保持されていない伝熱管のU字部が二次系冷却材の流れによって振動し、かつ、この管と支持板の隙間でデンティングが発生していたため管と支持板の間に滑りによる振動エネルギーの減衰ができず、管壁に振動による曲げモーメントに起因する高い応力が繰り返し加わったために高サイクル疲労により破断に至ったものと報告されている。

4.3 McGUIRE-1（米国）の事例

この炉では、下記の2回の破損例が報告されている。

（1）1989年3月7日に、SGから約1900リットル／分の漏れが発生したが、原子炉は安全に自動停止した。

SGから抜き取った伝熱管破損部の試験結果から、破損原因は応力腐食割れと考えられている。管の縦方向に走る破損部は、長さ約95mm、幅約9.5mmであった。伝熱管の材質はインコネル600であったが、外表面に破損部の下部約50mmから上部500mmまでに深さ約0.025mm、幅1mmの溝が走っており、この溝の長さ方向に沿ってひび割れが見られた。溝近傍に金属組織の乱れがあることから、管の熱処理後に溝が形成したと考えられた。また、**X線**による残留応力の測定では、耐力より若干低い局所的な応力の存在が示された。このような結果から、この管のみに発生した応力腐食割れによる破損と結論されている。

（2）1992年1月16日出力運転中に1次系から2次系への漏洩率が250ガロン／日を越えたため原子炉を停止した。伝熱管の試験で応力腐食割れによる軸方向の亀裂が発見された。破損伝熱管の前回ECT時に欠陥信号があったのを見落としていたのが原因である。

4.4 Arkansas Nuclear One-2（米国）の事例

1992年3月9日出力運転中に1次系から2次系への漏洩率が360ガロン／日を越えたため原子炉を停止した。伝熱管の試験で**粒界応力腐食割れ**により伝熱管肉厚の約90%に及ぶ周方向亀裂が発見された。破損伝熱管の前回ECT時に欠陥信号があったのを見落としていたのが原因である。

4.5 Palo Verde-2（米国）の事例

1993年3月14日98.8%出力運転中、蒸気発生器No.2で伝熱管が破損し、加圧器水位および圧力が下がったため、原子炉を手動で停止した。充填ポンプを追加運転したが加圧器水位が低下し、ECCSが作動した。1次系から2次系への漏洩率は最大909リットル／分と推定された。

4.6 美浜-2（日本）の事例

1991年2月9日に、定格出力運転中SGから約2600リットル／分の漏れが発生し、ECCSが自動起動して原子炉は安全に停止した。

SGの詳細調査により、伝熱管を支える振れ止め金具が設計通りに取り付けられていなかったため、管の外部を流れる二次冷却材の流速により大きな振動が発生し、管支持板部で伝熱管に繰り返し応力が作用して疲労による亀裂が発生し破断に至ったものと推定されている。

4.7 大飯-2（日本）の事例

1995年5月12日、主蒸気管モニタの警報が発信し、蒸気発生器伝熱管からの漏洩と判断し、原子炉を手動停止した。抜管して調査した結果、蒸気発生器伝熱管Uベント曲げ部周方向に割れが発生しており、伝熱管材料および一次系水質環境を考慮すると、一次系から応力腐食割れが発生し、一次系から漏洩（水の滲み）に至ったと推定されている。

5. 改定技術基準と蒸気発生器伝熱管U字管部流力弾性振動防止指針の策定

美浜2号機の蒸気発生器伝熱管破断は、運転中に二相流状態で管群内を循環している2次側冷却水による流力弾性振動に起因する高サイクル疲労によることが確認された。これを受けて、1992年に構造等の技術基準（告示501号）が改正され、外面に流体による励振力を受けるU字管群曲げ部に対する規定として、有効流速を限界流速で除した流力弾性振動発生判別値が1を下回ることが要求された。（[図4](#) 参照）

1993年から1999年にかけて国内運転プラントの蒸気発生器と同一最大曲げ半径U字管を有する実機大試験モデルによる実機並みの熱流動条件下での実証試験（5列の二次元管群試験）が実施された。この試験を受けて、日本機械学会では、流力弾性振動発生判別値の算定に当たって必要となる運転中の減衰比等、また、設計上の安定比評価のための係数（ $SR \times 1.4$ が1を下回ることを要求）の具体的数値を規定する「蒸気発生器伝熱管U字管部流力弾性振動防止指針」を策定した。本指針は技術評価の上、設計・建設規格2005の参照規格として引用されている。

〔用語解説〕

（*1）TT処理：Thermal Treatment であるが邦訳ではTTの後に「処理」を付ける。

700℃近辺で約10時間加熱し、合金中に含まれている炭素を炭化物として析出させ、且つ、炭化物の近傍にクロム（Cr）が少なくなる領域が生じないようにする熱処理である。炭化物はCrを取り込みやすいので、炭化物生成によりCr欠乏領域ができることがあり、Cr欠乏領域ができると応力腐食割れ感受性が高くなる。TT処理は、使用中に炭化物とCr欠乏領域ができる恐れのある含有炭素を、予め無害な炭化物に変えておく熱処理である。

（前回更新：2004年7月）

<関連タイトル>

[美浜発電所 2 号機蒸気発生器伝熱管損傷事象の概要 \(02-07-02-04\)](#)

[軽水炉における応力腐食割れ \(02-07-02-15\)](#)

[PWRの蒸気発生器 \(02-08-01-03\)](#)

<参考文献>

(1) ステンレス協会（編）：ステンレス鋼便覧-第 3 版-、日刊工業新聞社（1995年）、p.1320-1327

(2) 百々 隆ほか：原子力発電所の蒸気発生器取替作業の全容、原子力工業、Vol.41 No.4, p.6-44（1995）

(3) 山岡克彰ほか：火力原子力発電、vol.50, No.4, p59-67（1999）

(4) P E MacDonald et al.: Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365（1996）、p.85-103

(5) 火力原子力発電技術協会（編）：発電プラントの腐食とその防止、（1997年8月）

(6) 原子力発電技術機構：わが国の原子力発電所におけるトラブルについて、（平成元年～9年度）原子力発電技術機構

(7) 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 1997年版（1997年5月26日）、p.144-145

(8) 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2001年版（2001年8月7日）、p.150-154

(9) 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2002年版（2002年11月8日）、p.146-153

(10) 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2003年版（2003年8月15日）、p.180-188

(11) 原子力安全・保安院 独立行政法人原子力安全基盤機構：日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（2005年改訂版）並びに流力振動及び高サイクル熱疲労に関する評価指針の技術評価書（平成17年12月）

(12) 原子力安全研究協会（編）：軽水炉発電所のあらまし（1992年10月）

表1 わが国のPWR発電所の蒸気発生器(新設時)の仕様

会社名	プラント名	発電端出力 (万kW)	営業運転開始	ループ数	SG製造 メーカー 注1)	SG型式 注2)	伝熱管本数 (本/SG)	伝熱管材料 注3)
北海道	泊1号機	57.9	平成元年 6月22日	2	MHI	51F	3382	TT600
	泊2号機	57.9	平成 3年 4月12日	2	MHI	51F	3382	TT600
関西	美浜1号機	34.0	昭和45年11月28日	2	CE	CE型	4426	MA600
	美浜2号機	50.0	昭和47年 7月25日	2	MHI (WH) 注4)	44	3260	MA600
	美浜3号機	82.6	昭和51年12月 1日	3	MHI	51	3388	MA600
	高浜1号機	82.6	昭和49年11月14日	3	WH	51	3388	MA600
	高浜2号機	82.6	昭和50年11月14日	3	MHI	51	3388	MA600
	高浜3号機	87.0	昭和60年 1月17日	3	MHI	51F	3382	TT660
	高浜4号機	87.0	昭和60年 6月 5日	3	MHI	51F	3382	TT600
	大飯1号機	117.5	昭和54年 3月27日	4	WH	51A	3388	MA600
	大飯2号機	117.5	昭和54年12月 5日	4	MHI 注5)	51A	3388	MA600
	大飯3号機	118.0	平成 3年12月18日	4	MHI	52FA	3382	TT690
	大飯4号機	118.0	平成 5年 2月 2日	4	MHI	52FA	3382	TT690
四国	伊方1号機	56.6	昭和52年 9月30日	2	MHI	51	3388	MA600
	伊方2号機	56.6	昭和57年 3月19日	2	MHI	51M	3382	MA600
	伊方3号機	89.0	平成 6年12月15日	3	MHI	52F	3382	TT690
九州	玄海1号機	55.9	昭和50年10月15日	2	MHI	51	3388	MA600
	玄海2号機	55.9	昭和56年 3月30日	2	MHI	51M	3382	MA600
	玄海3号機	118.0	平成 6年 3月18日	4	MHI	52FA	3382	TT690
	玄海4号機	118.0	(建設中)	4	MHI	52FA	3382	TT690
	川内1号機	89.0	昭和59年 7月 4日	3	MHI	51M	3382	TT600
	川内2号機	89.0	昭和60年11月28日	3	MHI	51F	3382	TT600
原電	敦賀2号機	116.5	昭和62年 2月17日	4	MHI	51FA	3382	TT600

注1) MHI：三菱重工業、CE：Combustion Engineering、WH：Westinghouse

注2) WHおよびMHIのSG型式は伝熱面積を表し、ft²単位で表した表面積の上2桁をとる

注3) いずれもインコネル材。MAはルミ・アニール材、TTは特殊熱処理材

注4) 2基の内の1基は伝熱管の曲げ加工までWH社で実施。最終組立は2基ともMHI

注5) プラント主契約はWH社であるが、SGはWH社の設計に基づきMHIで製造

[出典]百々 隆ほか：原子力発電所の蒸気発生器取替作業の全容、原子力工業、Vol. 41, No. 4, p7(1995)

表2-1 わが国のPWRにおける蒸気発生器伝熱管の
損傷(1/2)

プラント名	発見日	損傷モード
玄海-1	1989年 4月27日	管板上面直下部及び管支持部にEC欠陥信号(注1)
伊方-1	1989年 6月12日	管板拡管部にEC欠陥信号
美浜-1	1989年 6月21日	管板直上部EC欠陥信号
高浜-1	1989年10月 4日	U字部、管支持板部、管板拡管部及び近傍にEC欠陥信号
美浜-3	1989年10月25日	管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
大飯-1	1989年11月14日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-3	1989年11月29日	振止め金具部にEC欠陥信号
大飯-2	1990年 2月28日	振止め金具部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-4	1990年 3月13日	U字部振止め金具部にEC欠陥信号
美浜-2	1990年 5月25日	管板直上部及び管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-2	1990年 6月29日	管支持板部、管板上面直下部にEC欠陥信号
伊方-1	1990年10月18日	管板拡管部にEC欠陥信号
大飯-1	1991年 1月18日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-1	1991年 1月30日	U字部、管支持部、管板拡管部及び近傍にEC欠陥信号
高浜-3	1991年 3月28日	U字部振止め金具取付け部にEC欠陥信号
美浜-3	1991年 3月28日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
川内-1	1991年 5月14日	振止め金具部にEC欠陥信号
大飯-2	1991年 5月16日	振止め金具部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-2	1991年 6月19日	管支持板部、管板上面直下部にEC欠陥信号
川内-2	1991年10月15日	振止め金具部にEC欠陥信号
玄海-1	1992年 1月10日	管板上面直下部及び管支持部にEC欠陥信号
伊方-1	1992年 1月21日	管板拡管部にEC欠陥信号
大飯-1	1992年 3月27日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-1	1992年 5月19日	U字部、管支持部、管板拡管部及び近傍にEC欠陥信号
伊方-1	1992年 5月21日	振止め金具部にEC欠陥信号
美浜-3	1992年 6月 4日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
美浜-1	1992年 7月30日	管板直上部で局部腐食のため漏洩
高浜-2	1992年11月25日	管支持板部、管板上面直下部にEC欠陥信号
大飯-2	1992年12月 4日	管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
玄海-1	1993年 4月 6日	管板上面直下部及び管支持部にEC欠陥信号
伊方-1	1993年 4月27日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-1	1993年 6月 2日	U字部、管支持部、管板拡管部及び近傍にEC欠陥信号
美浜-1	1993年 6月29日	管板直上部にEC欠陥信号
大飯-1	1993年 7月29日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
美浜-3	1993年11月16日	管支持部、管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
大飯-2	1994年 4月26日	管板拡管部及びその境界部にEC欠陥信号
高浜-1	1994年10月26日	U字部、管支持部、管板部及び近傍にEC欠陥信号
美浜-3	1995年 5月12日	管板拡管部、拡管境界部及び支持板部にEC欠陥信号
大飯-2	1995年 5月12日	管板拡管部、拡管境界部及びU字部にEC欠陥信号 (漏えい信号により炉を停止し、点検時)
伊方-1	1995年 5月29日	管板拡管部にEC欠陥信号
大飯-2	1995年10月25日	管板拡管部、拡管境界にEC欠陥信号(定期検査時)
伊方-1	1996年 4月22日	管板拡管部にEC欠陥信号
伊方-2	1996年 5月21日	管板拡管部にEC欠陥信号
伊方-1	1996年10月18日	管板拡管部にEC欠陥信号
玄海-2	1997年 9月 1日	管板拡管部にEC欠陥信号
伊方-2	1997年10月 3日	管板拡管部にEC欠陥信号

(注1)欠陥信号は健全部と異なる信号であり、必ずしも損傷とはつながらない。
下記の出典をもとに作成した。

[出典] 原子力発電技術機構:わが国の原子力発電所におけるトラブルについて
(平成元年～9年度)

表2-2 わが国のPWRにおける蒸気発生器伝熱管の 損傷(2/2)

プラント名	発見日	損傷モード
玄海-2	1998年11月30日	管板拡管部にEC欠陥信号
伊方-2	1999年 2月18日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-4	1999年 5月27日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-3	2000年 3月16日	管板拡管部にEC欠陥信号
玄海-2	2000年 3月31日	管板拡管部にEC欠陥信号
伊方-2	2000年 5月26日	管板拡管部にEC欠陥信号
美浜-3	2000年 9月 1日	管板上部にEC欠陥信号。前回の定検時の溶断作業で発生した2次生成物による管の摩耗と推定
川内-1	2000年 9月14日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-4	2000年10月 2日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-3	2001年 7月 6日	管板拡管部にEC欠陥信号
高浜-4	2002年 1月30日	管板拡管部にEC欠陥信号

下記の出典をもとに作成した。

[出典] 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2001年版(2001年8月)、p.150-154
 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2002年版(2002年11月)、p.146-153
 日本原子力産業会議：原子力ポケットブック 2003年版(2003年8月)、p.181-188

表3 わが国のPWRにおける蒸気発生器伝熱管の損傷等と補修状況

(損傷の発生しているプラントのみ記載) 1994年12月末現在

会 社	プラント名	SG型式	伝熱管本数 ×SG基数	施栓本数	スリーブ本数 注1)	等価施栓率 注2) (%)	主な損傷モード
関 西	美浜1号機	CE型	4426×2	1891	0	21.4	腐食減肉、ピitting
	美浜2号機 注3)	44	3260×2	411	41	6.3	腐食減肉、2次側SCC、1次側SCC、摩耗減肉
	美浜3号機	51	3388×3	797	0	15.0	1次側SCC、IGA、摩耗減肉
	高浜1号機	51	3388×3	1095	77	10.8	腐食減肉、2次側SCC、1次側SCC、IGA
	高浜2号機 注3)	51	3388×3	1610	4425	18.0	IGA
	高浜3号機	51F	3382×3	26	0	0.3	摩耗減肉
	高浜4号機	51F	3382×3	21	0	0.2	摩耗減肉
	大飯1号機 注3)	51A	3388×4	2253	5511	18.5	1次側SCC、IGA
	大飯2号機	51A	3388×4	704	0	5.2	摩耗減肉、1次側SCC
四 国	伊方1号機	51	3388×2	405	13	6.0	1次側SCC、摩耗減肉
	伊方2号機	51M	3382×2	4	0	0.1	摩耗減肉
九 州	玄海1号機 注3)	51	3388×2	683	3164	12.6	IGA
	川内1号機	51M	3382×3	17	0	0.2	摩耗減肉
	川内2号機	51F	3382×3	19	0	0.2	摩耗減肉
原 電	敦賀2号機	51FA	3382×4	2	0	0.1	摩耗減肉

注1) スリーブの個数にかかわらずスリーブが取り付けられている伝熱管の本数

注2) スリーブによる伝熱性能低下、流動抵抗増加を等価的に施栓本数に置き換えて施栓本数に加えた数値

$$\text{等価施栓率} = \frac{\text{施栓本数} + \text{スリーブを等価的に置き換えた施栓本数}}{\text{伝熱管本数}} \times 100(\%)$$

注3) SG取替を終了、または実施中のプラントは取替前のSGの最終の数値

[出典] 百々 隆ほか：原子力発電所の蒸気発生器取替作業の全容、原子力工業、Vol. 41, No. 4, p8(1995)

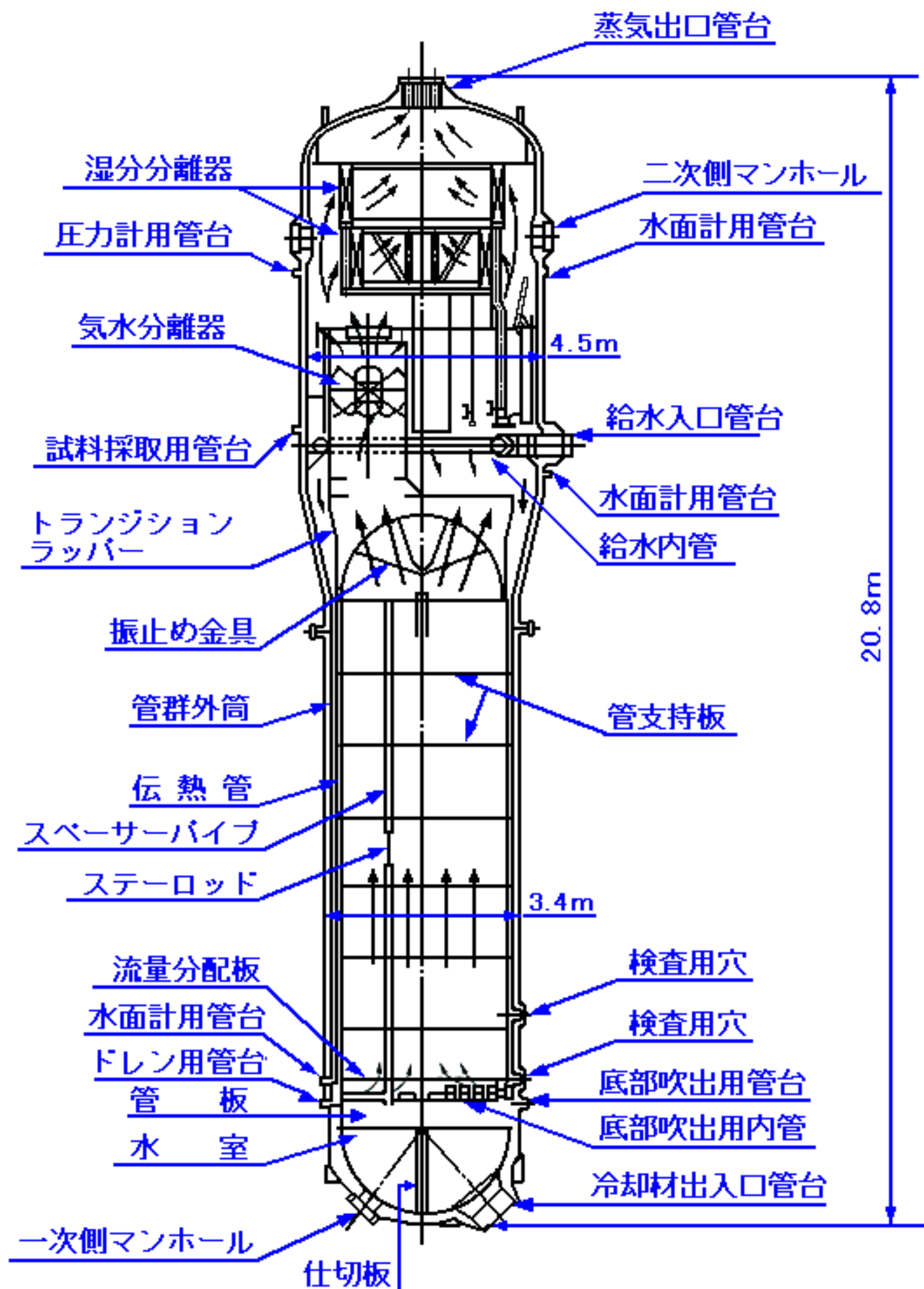


図1 蒸気発生器の構造

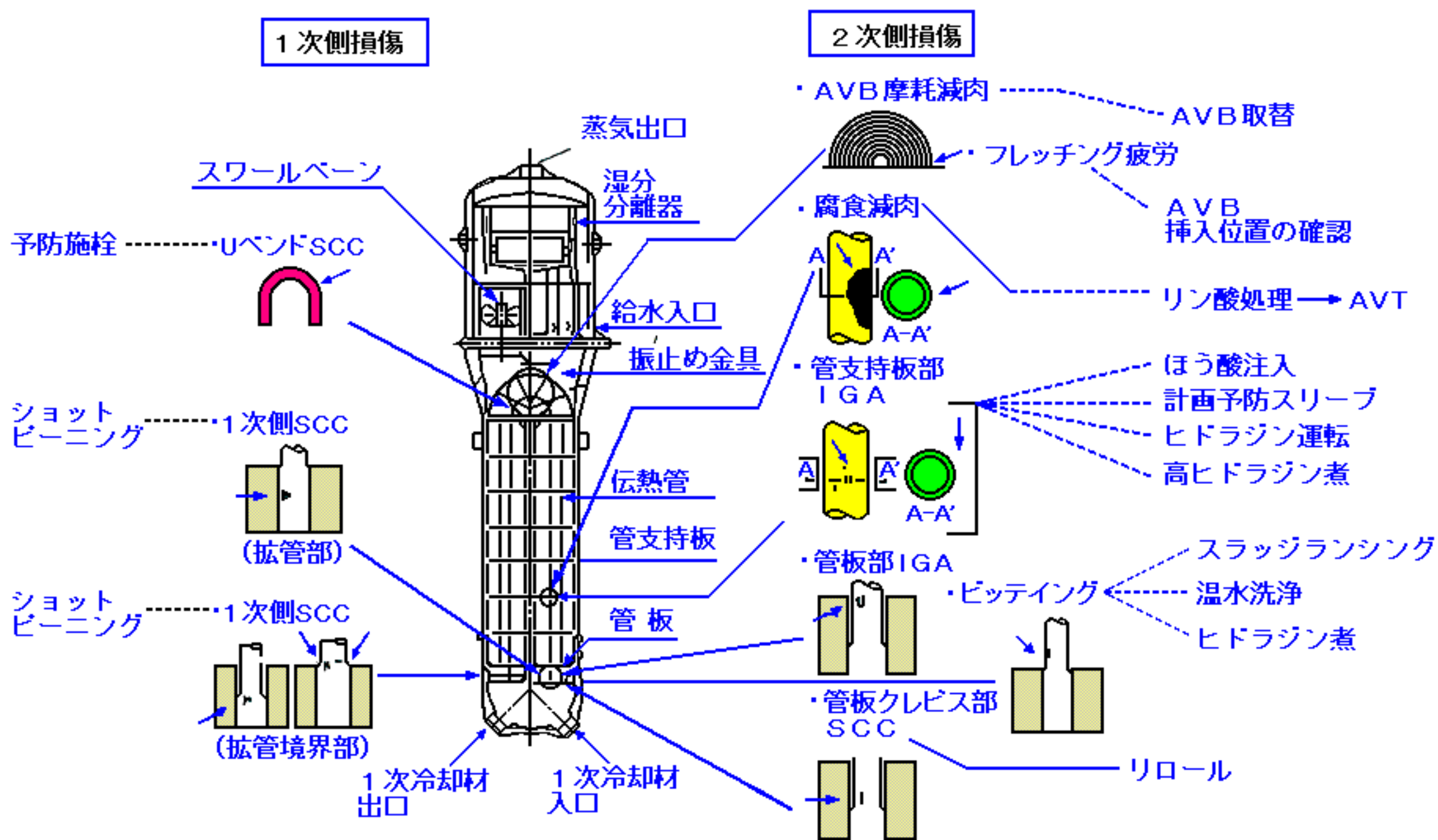


図2 蒸気発生器の伝熱管腐食損傷と損傷部位

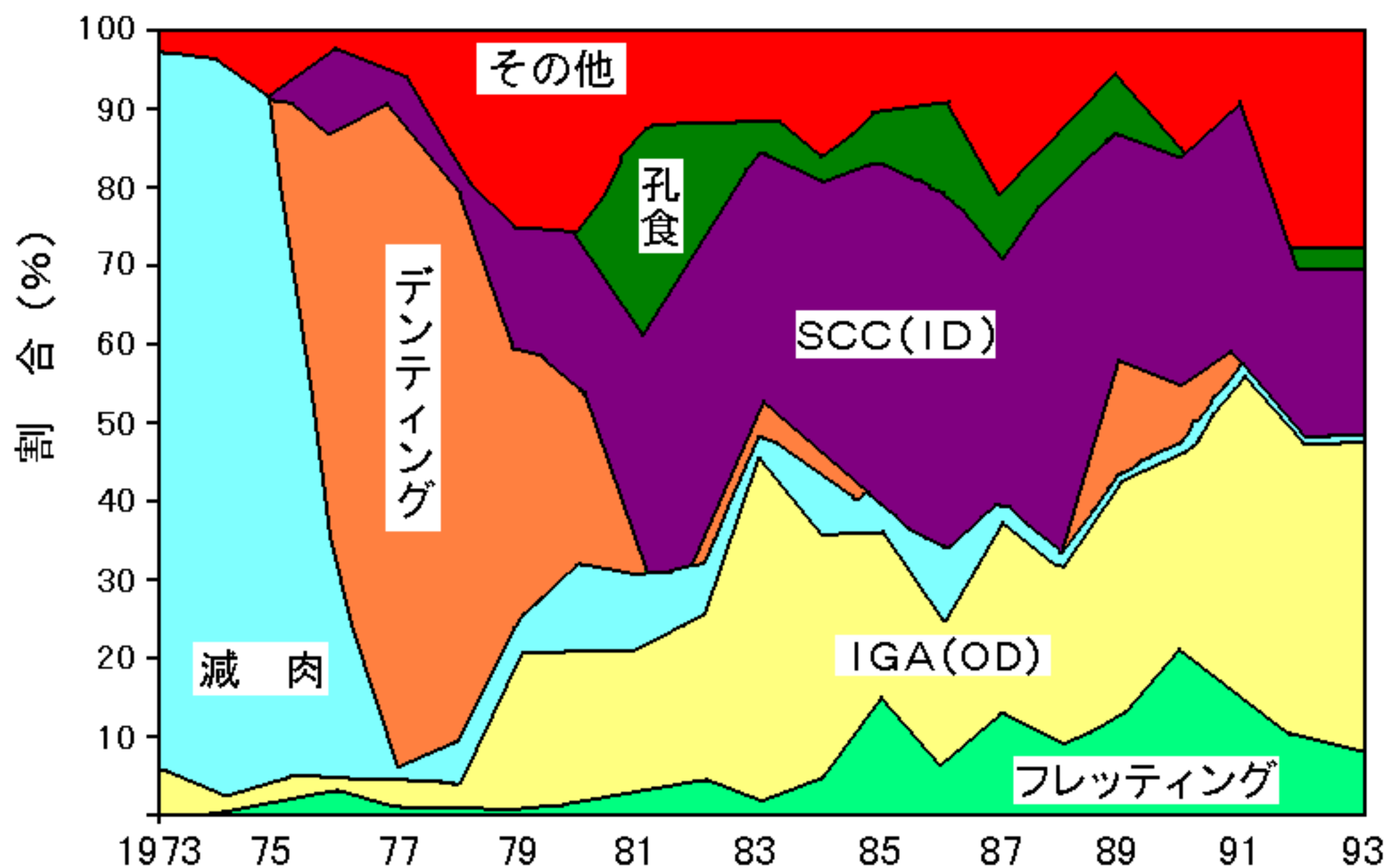
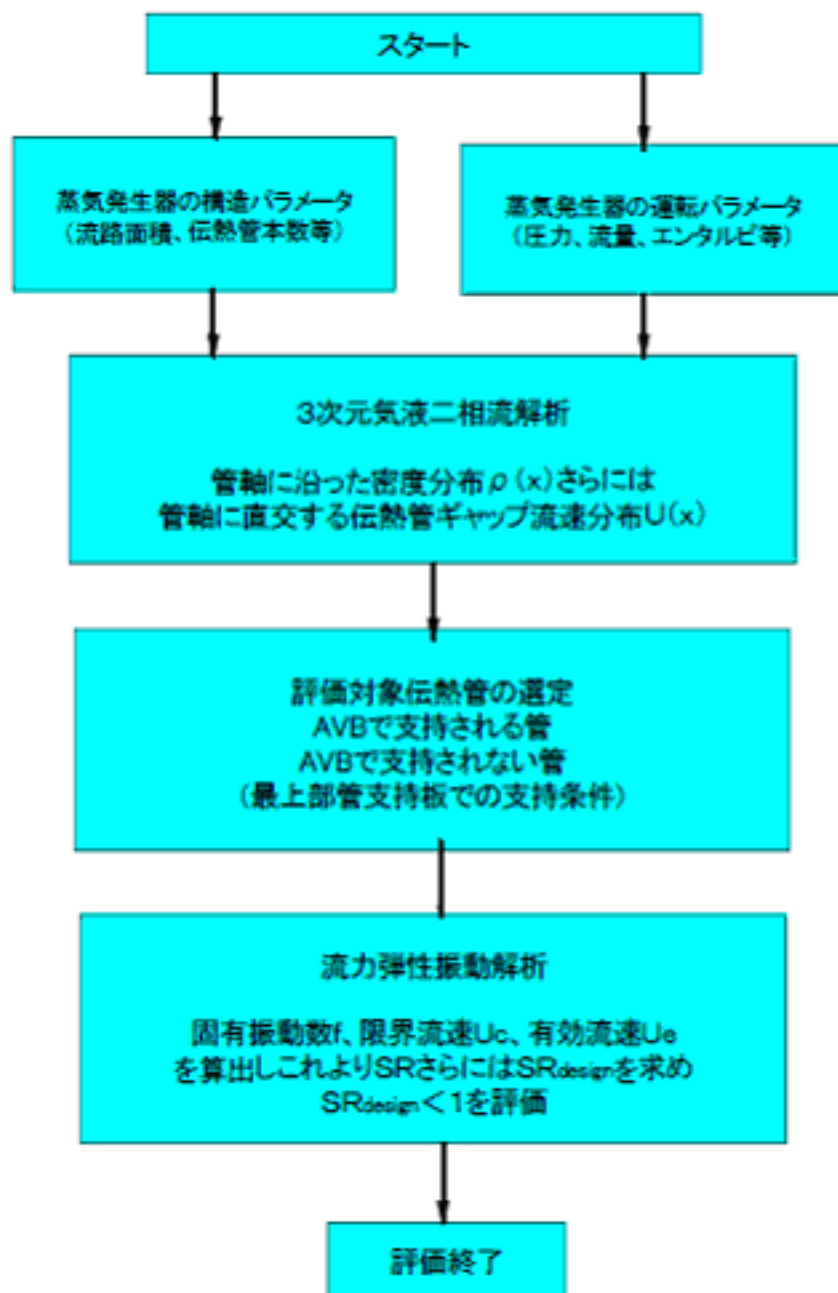


図3 世界における蒸気発生器伝熱管の損傷原因別割合の変遷

[出典]火力原子力発電技術協会(編):発電プラントの腐食とその防止(1997年8月)、p.199



(注) 蒸気発生器伝熱管2次側に対する気液二相流解析を実施し、伝熱管の管軸に沿った密度分布 $\rho(x)$ 及び管軸に直交するギャップ流速 $U(x)$ を求める。次いで蒸気発生器伝熱管の振動解析を行い、各モード毎に運転中の固有振動数 f 、有効流速 U_e さらには限界流速 U_c を算出し、これらから流力弾性振動発生限界評価式により安定比 (SR) を求め評価する。

図4 蒸気発生器伝熱管U字管部の流力弾性振動発生限界評価手順

[出所] 原子力安全・保安院 独立行政法人原子力安全基盤機構: 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(2005年改訂版) 並びに流力振動及び高サイクル熱疲労に関する評価指針の技術評価書 (平成17年12月)、
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g60221c01j.pdf>、36/80