他の七つの煮沸器にも損害を与え、更に2人に致命傷を負わせた。事故は夜に起こった。もし、爆発が日中に起こっていたなら、更に多くの人々が傷を負っていたであろう。財産の損害は50万ドル以上であった。工場は約1年間仕事ができなかった。調査の結果腐食が外壁の厚さを半分以上侵していたためにこの破壊が起こったことが判明した。

事故 2—15 ft, 48 in の温水貯蔵タンクの場合である。これは1952年に正規条件下にて操業中に爆発を起こした。建物は完全に破壊された。財産の損害は約10万ドルであった。

調査の結果、内面の腐食が50%以上も板厚を減じていたことが明らかにされた。

事故 3—液体アンモニアと窒素貯蔵タンクの場合である。長さ39 ft, 直径108 in のこのタンクは1953年に爆発を起こし、約5万ドルの財産の損害をこうむっている。幸運にも、タンクはタンク地区の広いところに設置されていた。

ここでも、内面の腐食が最初の外壁の板厚を50%以上侵していた。

腐食度の重要性

検査によって装置の腐食が生じている領域を見つけ、その腐食の様相と腐食度も決定しなければならぬ。破損を招くことになる応力割れは腐食によって加速される。また腐食によって生じた孔食は割れを生じさせる応力の焦点となる。

腐食度の有効な推定は一定の最大許容作業圧力と安全率を保持する装置を確保するために、手遅れにならぬよう装置の部品を修理したり、または取り換えを行なうことを可能にする。もし、腐食度がわかれば、操業と安全に責任を負っている人には修理や全体の取り換えの計画ができる。

保険会社からの検査員は工程の専門家ではなく安全管理の専門家である。彼は腐食の原因の判定に助力できるし、腐食を抑制することの暗示ができる。必要があれば助言者として特殊分野の専門家を推せんもできる。

保険会社がボイラと機械類に関して規定した災害防止と検査奉仕は製造原価の低減に重要な因子である。災害防止の利益は金だけで評価することはできない。

しかし、破滅的な災害は不幸にして災害防止に成功しなかった場合にニュースとなるのである（原文には災害現場の写真があるが省略した）。

飢 え た 水*

W. D. Mogerman**

1. ま え が き

大きな河口町に住む雄弁な牧師が、その河の“動く道”としての多方面にわたる重要性に感銘して、常にお祈りの最後には、大きな河が皆大きな都市を通して流れるようにした天の配剤に感謝を捧げたと伝えられている。もしこの伝説が真実であるならば、この牧師は重点の置き方がいくぶん誤っていたとはいえ、彼の考え方は正しくむしろ彼の謙譲さは尊敬に値すると思う。彼は明らかに淡水、現在においても主要な天然資源である淡水の連続的供給が根本的な重要問題であることを理解していたからである。

アダムが穴を掘り、イブが泳ぎ¹⁾、モーゼが貴重な液体を求めて岩を叩き回ったこの世の始まりから今日に至るまで、一刻といえども家庭経済、生物学的福祉が衛生的な飲料水に依存しない期間はなかった。現代では水は水道の蛇口から得られ、われわれはその清浄力に確信を

持ち、現今の化学的経験に対して信頼感を持ってこれを飲用に供している。最近では先駆者的な産業経済にとっては非常に純粋な水の連続的供給が外的用途として急激に必要な欠くべからざるものとなってきている。この両者、水道水と工業用水とはいかなる意味においても同一ではない。どちらも高い純度が必要であるが、しかし純粋さはしばしば驚くほど異なった条件で定義される。10年いやわずか5年前に優良と考えられた工業規格が今日では正当な理由によって廃棄されている。そして現在あるものと、必要とするものとの間の競争は常に段々激しくなっている。

2. 純度は飲料水としては良好である

われわれの都市における良質の水道水の平均組成について考察して見よう。それはたぶんそして一般に味が良く、特に塩素を好む人にとってはそうであろう。それは無色で、少なくとも浴用として十分に軟質で、濁りなく、病原菌も無害な程度に少ない。酔払いのあるものは塩素処理に苦情を言うかも知れないが、非常に雑踏した遠隔の場所では飲料水と見なされるものの一口が彼らを

* 訳者：福谷英二（中川防蝕工業KK）

** Editor, INCO Corrosion Reporter
(原文) Hungry Water. INCO Corrosion Reporter,
Vol. 6, No. 4 (1960) Apr.

沈黙させるであろう。われわれの水は結局良い飲料水で世界の他の国の人々の飲用している水よりも良いのである。

化学処理を行なう人はこのことを熟知しており、躊躇なくこのような水を飲む。しかし彼らの多くはこのような水を彼らの装置にふれさせないであろう。悪魔が聖水に対する良く知られている態度も、彼らが飲料水に対してとる態度よりも頑固ではないであろう。

これらの化学専門家は、その家庭では水道水を喜んで使用するが、彼らの工場では急に頑固になる。彼らはそこでは全く異なった性質、たとえば鉄、マンガン、銅、溶解ガス等を含まない種類の水を希望する。これらまたは他の不純物は製品または生産施設に害を与えるため嫌われるのである。彼らが精巧な染物、鏡、合成樹脂、陶器その他の製品に点や縞の現われるのを好まないことは当然である。一般のボイラ、電気施設用の水としては硬度、珪素、ガス等の含有度の低い水が古くから要求されている。スケール生成傾向、一般腐食等もまた重大な考慮すべき事項であることは昔から変わらない。実際において、ほとんどの各産業の分野でそれぞれ独自の、更に純度の高い水に対する要求が次第に強くなってきて、その純度を確保するのに相当の困難と経費を要するようになってきた。長年の間多忙な人々が会社の費用で長途の旅行をして会合し、水の純度を上げるに役立つ、またいかにして純度を上げ得たかの文献を読み、かつ討議を行なってきた。

水の不純分に対する戦い、前回会戦以後部分的に捕獲を免ぬかれた不良分子をいかにして捕えるかの作戦が立てられ分担が決められる。専門家のあるものは食事のための休戦時にまで不純分に対する敵意を持ち続け、すぐ手の届くところにある卓上の水を無視して別の飲物を要求する。食事に入ると彼らもいくぶん軟化して余り純粋でない世俗的な物質にしばし心を馳せるであろう。しかし食後には厳格に水の高い純度を追求し、夜遅くまでこれを繰り返すであろう。道学者にとってはこれは教戒に値することかも知れないが、技術的問題に関する限り彼らをして熟考せしめることが必要である。

3. 新しい分析方法の進歩

多年の間会議場では前記のような光景が見られてきたが、最近の10年以内に一連の新しい分析法が行なわれるようになり、化学産業の専門家をも含む旧消費者を水さしから何でも飲む原始的消費者と同様にしてしまった。

第二次世界大戦以来起こったある産業は微小な不純物を見出すのに新しいオーダーの検出法を案出した。新しい超高温高压蒸気機関や原子動力装置の管理に当る人々が代表的な新グループの人々である。これらの操従者は

狂的と思われるほどの水規格を強要する。彼らはまだかつて聞いたこともない程度の低い電導度を要求し、化学的不純物を ppb のオーダーで要求する。このような休みなき発展の結果“飢えた水”という術語が考え出された。水の純度が上がるにつれて水の化学的侵食性および親和力が増大するからである。特に高温ではこの傾向が強い。

最近まで彼らの厳しい規格に適合するほど精度の高い分析法は知られていなかった。しかし必要の圧力によってその特別の要求に適合し得る新しい分析法が進歩して、今日では ppb の何分の一かの精度が得られるようになった。蒸気の純度を計測するのに、残渣を秤量する重力式の古い方法は遅くて精度が低いことはずっと以前からわかっていて、一層正確で迅速な電導度計測法が考え出された。しかし最新式のボイラで造る蒸気の純度が上がるにつれて、更に純度の高い蒸気が要望されるようになり、不純分決定法としての電導度計測法も欠点を示すようになってきた。比電導度が $1\mu\sigma$ 程度の高純度の蒸気を用いても、過熱管やタービン翼の堆積物のため事故を起こす装置もできた。電導度測定法は蒸気中の真の固形物のこのように低い含有量を測るには精度が十分でないことが明らかとなった。その理由はイオン化し得る微量のガスの存在によるもののように思われる。イオン化しない不純分に対してはもっと感度の高い新しい分析法が必要である。きわめて純度の高い蒸気に対しては焰光スペクトル写真測定器が良い成績を示した。電導度測定法は蒸気の正しい電導度が $1\mu\sigma$ あるいはそれ以下の場合のほかは依然として価値があり常に用いられている。一般用としては非常に精度の高い比色試験のすばらしい表が作られ、試料採取と不純物の濃度を高めるすぐれた装置と併用されている。

最近の水の進歩という観点では、その熱心さにおいて前述の牧師に全く同意せざるを得ない。しかし彼を勇気づけて“純粋のためにはすべてが純粋でなくてはならない”といわせるように飛躍させてはならない。ほとんどすべての化学者は常に不純分を探し求めているが、そのような規格では困難を感じるに違いない。いかに人智の限りをつくしてもいかなる水でもごく小さな不純分が残ることを知っている彼らにとっては、特に分析においては、それは常に反省を続けている問題である²⁾。高い程度の純度は平素の深謀と各段階における注意深い監視と貯蔵や取り扱いに適正な耐食性をもった装置を使用することによって達成されることは明らかである。今日毎日使用されている比較的純度の高い水や特殊用途の極端に純度の高い水は、2世紀以上前に始められた先駆者的研究に負うところが多い。これら研究の跡をたどれば直ちに嘆賞すべき Henry Cavendish の偉大な19世紀の

発見に導かれる。

4. いかにして大発見はなされたか

このような仕事の第一段階はたぶん Henry Cavendish のような偉大な人間を見出し、すべての問題を彼にまかすことであろう。彼以外の誰でも彼のように不思議なことをしようと思う人はなさそうであるからである。“すべてのものは計測、数および重量によって配列される”と Henry Cavendish はいい、その一生をそうするように努めた。

ゆえに彼が他のものと同様に水に興味を持ったときには Bloomsbury にある彼の家から Oxford 街の Rathbone Place にある共同ポンプの所に出かけて London の水の試料を手に入れた。彼はその水の不純物を調べようと思った。それは 1767 年である。Cavendish はその前年に水素の分離に成功していた。酸素はまだ Joseph Priestley によって発見される前であった。この偉大な 2 人とも 1767 年には活性で可燃性の二つのガスが世界で最も貴重な液体を作ることを見事にできなかった。水は当時元素であると考えられていた。古典ギリシヤ的な感覚でなく Robert Boyle によって定義されたその当時としての最新の感覚によってである。聖書によれば天地創造の最初の日に、この基本的な液体は作られた。多数の人にとっても J. B. van Helmont や昔の多くの作家によっても、創造者がそんな多忙なときに化合物を作ることには心を遣うはずはないことは明らかであると考えられていた。ゆえに定義によって水は元素であり、Priestley を含む多数の研究者は水を長時間加熱することによって他の物質ができると決定した。

正当な方法で、Cavendish や他の人々はこのことが起こらないことを証明した。蒸留水を長時間加熱しても土はできなかった。しかし 1767 年に Cavendish は蒸留しない水の一時的硬度と永久硬度との差を知った。彼は Rathbone Place の水中の石灰質の物質（重炭酸石灰）が炭酸ガスによって液中に溶出し、石灰の添加によって沈殿することを証明した。

しかしこの発見はほんの小さなことである。時が経過した。Cavendish はその間水中の不純物のあるものを分析し、その研究に静電気を使っていた。しかし常に彼は液体自身の秘密の組成について考え続けていた。遂に 1781 年に彼はガスと電気との知識を組合せ得るようになった。彼は厚肉のガラスで燃焼球を作ったか作らせたかした。ガスは底部につけた黄銅製のコックから入れるようにし、側方が突き出た管に空気ポンプを取り付けた。2本の絶縁電線が導かれていて静電気による火花を発生できるようにしてあった。燃焼球内の空気をポンプで排除した後、真空によって 5 mol の空気と酸の中で金属を溶かして得た水素を 2 mol 吸い込ませた。それから

彼は火花を発生させた。大きな爆発が起こった。空気の一部（窒素）が残ったが、Cavendish はそれには驚かなかった。彼は球の壁を覆っている新しい露のような物質を見詰めていた。彼はこの貴重な露について多くの試験をしたが、彼が見出し得たものは少しばかりの硝酸のみであった。ハックルを持っている全読者はそれを上げて貰いたい。この人は今正にこの世で最も偉大な化学的秘密を解きかけており、かつそれを知ったからである。

Cavendish は Priestley が最近発見した酸素を一般空気の代りに用いて試験を繰り返すことを決定した。今回は入れるガスを乾燥し温度と圧力に対して修正を行なった。水素 2 mol と酸素 1 mol が入れられた。両者とも不思議な仮名が用いられていた。火花が飛ばされ、大きな爆発が起こった。しかし今回は燃焼は完全であった。ガスは皆消滅し、また不思議な露があった。Cavendish は種々試験した結果“それは純水である”といった。

かくて科学の歴史上最も基礎的な発見の一つがなされ、水の組成の知識に依存する諸発見の大氾濫をもたらすこととなった。この大発見に用いられた燃焼球は現在 Manchester 大学で見られる。

既に暗示したように Cavendish の死は普通の病死ではなかった。電気を通して後燃焼も計量もはじまらない中に彼は 1810 年 2 月 24 日に死亡した。それから長年経った後有名な物理学者の James Clerk Maxwell が Cavendish の手帳を調べて未刊行の最も重要な電気的結果を見出した。また非常に不可思議と思われていたことも明らかとなった。多年の間物理学者達は、この先駆者の時代に Cavendish がいかにして荷電の力を評価し得たかを疑問としていた。それは基準となるべき電気測定原理が発見されるずっと以前のことであったからである。“Cavendish は自分自身が電流計であった。電流の強さを比較するため彼は自身の身体を通して電流を流した。手首や肘に感ずる衝撃の強さによって彼は二つの衝撃のうちどちらが強力であるかを評価した”と Maxwell は説明した。Cavendish は科学のため自分自身を苦しめ、終生そのことを黙して語らなかった。

水が二つの可燃性の強いガスからできているという驚くべき事実は次第に文明世界に受入れられてきた。水素は酸素の中で燃え、酸素は水素の中で燃える。一般人の心の中には燃焼を支える必要条件に対する漠然とした概念のためこのことに関して若干の混乱があった。古い時代にこのような混乱のあったことはもっともなことである。水素の燃焼が Cavendish によって発表されたのはほんの最近のことであったからである。Pilat de Rozier は酸素が水素と同様に燃えることを身をもって

学んだ。

Rozier はフランスの風船乗りで、客を接待するのに肺に水素を満し唇から出るときにこのガスを燃焼させることを良くやった。パリ人達は毎日このパリ人が悪魔の火を噴き出すのを見て驚いていた。ある日この勇敢な男は誤りを冒し空気と水素の混合物を吸い込んだ。今度はこの混合ガスが燃焼したとき、水素の可燃性は Pilatre の体内の酸素によって支持された。爆発が起こり彼の頭がふっ飛ばすかも知れないほどであった。しこたま懲らされた Pilatre はこの経験は誤りによって起こったものであることを認め“歯が全部ふっとんだ”ように感じたと言った。

Cavendish が水素の 2 mol が酸素の 1 mol と化合して水を造ることを証明した数年後に、他の科学者が電解によって水を分解し元のガスに戻した。これでこの問題に関する論争は終りを告げた。自分達で作った障害物のため過去の研究者達は問題を非常に複雑なものとしていた。水素と同様の挙動をするいくつかの可燃性ガスが自然に存在することが以前から観察されていた。これらは総括して“可燃性空気”と呼ばれ個々に区別されていなかった。

1766 年に偉大な計測者 Cavendish は最初にその物理的性質によって水素を区分し、それを“金属から得た可燃ガス”と呼んだ。彼はこのガスが金属を溶かすに用いた酸から出たものでなく、金属から出たものと考えたが、これは一歩前進であった。彼がどのように考えまたこのガスをどう呼ぼうと、彼は正確に水を造る実験を繰り返す方法を知っていた。Priestley が酸素と一酸化炭素、これらも奇妙な仮名で呼ばれていたが、を用いて水を造る実験を繰り返したが、理解し得る理由によって水を造ることはできなかった。その当時は量的の資料が余り多くなかったので、頑冥な混乱が少なくなかった。一酸化炭素は軽くて可燃性ではあるが、最も才能に恵まれた研究者でも水を造るにはやはり水素を必要とする。

5. 蒸気動力装置用の水

現代の産業文明は水を蒸気とすることによって人が石炭のエネルギーを機械的仕事に換える方法を知るまではほとんど発達しなかった。石炭あるいは化石燃料が遠い将来に原子力か何かに全く取って替えられるか否かは別として、現在のところ蒸気はなお動力の発生に最も重要であり、将来も永くそうであろう。なおきわめて純度の高い水から造った蒸気は原子核エネルギーの付属物として必要である。海から空、陸を通して海に帰る長旅の間に、水は蒸気ボイラ用水とし用いるのに有害な沢山の物質を溶し込む。昔はこれらの不純物がボイラ爆発の原因であり、また効率低下の原因となることが多かった。先代頃からボイラ水の科学的状態は驚くほど進歩した。水

処理の狙いは常に効率を上げ、事故を防止し、保守作業を減ずること等によって蒸気発生に要する人力と経費を最小に保つにある。

水の中の不純分を除かないときは、(1) 溶解したままボイラの中にとどまり、連続的あるいは間欠的な吹き出し作業によって除去されるか、(2) ボイラスケールとして析出するかあるいは軟泥として沈殿するか、(3) 蒸気に捲き込まれてボイラから出て蒸気過熱器や機械に入るかする。ずっと昔 Hudson 河を運航する蒸気船のボイラ室は爆発の危険から守るために船客を大きな構造物の後にして別の艀に積込んだ時代があった。昔はボイラの胴や管がスケールで厚く被覆されたための爆発が非常に多かった。爆発が起こらない場合でも過熱による管の故障、フクレ等が少なくなかった。今日用いられているような高温、高圧のボイラではこれらの事故は水処理によって防止しなければならぬ大きな災害を招くであろう。

たとえば珪素を発電機用蒸気から除去しなければタービンに入ってタービン翼にガラス状の堆積物が付着し効率を害しタービン出力を低下するであろう。技術者がタービン翼の設計にかたむけた大努力もこの種の汚損によって全くむだとなってしまう。蒸気中に含まれた Fe_3O_4 もその大きさがある“有限”の大きさであれば翼を潰食させることができる。水は常にボイラの鋼と作用している。特に溶存酸素があるときはそうである。ゆえに全体の操作上一般腐食によって生じた酸化鉄粒子に対して適切な考慮を払わなければならない。

天祐によって普通の温度、圧力のボイラの壁面やその他の部分は、最初に生じた酸化皮膜によって大体水から保護されている。この酸化膜は酸素がなくボイラ水が少しアルカリ性のときは維持される。もしこのことが事実でないならば、炭素鋼はボイラ建造用に使うことができないで、何年も昔に動力装置用として使用し得なくなっていたことであろう。もちろん最近過熱蒸気の温度圧力は次第に高くなってきたので、もっと耐食性皮膜の強い合金が用いられるようになってきた。最近のボイラは超高温高圧でなくても水の純度に対する要求は厳しくなっている。しかし温度 1,200°F 圧力 5,000 psi にまで上った今日の超高温高圧ボイラでは水質の規格は一層高められてきた。Ohio Power Co. の Philo 工場では次の代表的規格を定めている。

全溶解固形物<500 ppb, 珪素<20 ppb, 鉄<10 ppb, 銅<10 ppb, 溶解酸素<5 ppb, pH 9.5~9.6

この高い純度およびそれ以上の水がイオン交換脱鉱物処理と脱気処理、注意深い操作、耐食性の装置での貯蔵等によって常に得られている。

貫流ボイラでは溶存固形物はできるだけ低くしなければ

ばならない。これらの塩類は析出したり、タービンに運ばれることが予期できるからである。ボイラを通過した高い濃度の固形分は、タービンで堆積物を作り周知の悪影響を及ぼす。貫流ボイラに関するドイツの経験では高い給水中の固形分は一般にボイラよりもタービンに問題を起こすことを証明している。ボイラに入る前の諸装置での腐食およびそれによる金属の水に入るのを最小にすることは、一般に通常のボイラサイクルに似ているが、同様に重要なことである。ボイラ内で鉄や銅が著しく堆積物を作るのを防ぐため、初めの給水中の鉄分や銅分は 10 ppb に制限されているからである。これらの値は初め任意に定められたものであるが、試験用ボイラや常用ボイラでの長期試験の結果、実際のであり必要であることが証明された。

pH 調節用の揮発性薬品は鉄分の入るのを十分に減少させる。銅のような非鉄金属に対してはこれらは余り有効でない。揮発性添加物の化学的特性に鑑み、70-30 キュプロニッケルが最初復水器および給水加熱器用の管材として選定された。同じ pH 状態の下に数種の合金を用いて行なった小型試験用復水器の結果は銅の混入³⁾量に関してはこの選択は妥当であることが証明された。

超高温高温蒸気装置の工場では純水の貯蔵および取り扱い用装置にオーステナイト系ニッケルステンレス鋼を用いているものが多い。Eddystone の Philadelphia 電気会社の新しい 325,000 kW の発電機は 1,200°F, 5,000 psi の超高温高温蒸気を用いており、たぶん世界中で最も厳しい条件である。この装置は極端に蒸気消費率が低く、8,000 Btu/kW・hr に近い。このことは熱効率の相当な上昇を意味している。“熱が加えられると水の温度圧力は限界点まで上昇する。この限界点では蒸気の密度は水の密度と等しくなり蒸気は沸騰を伴わないで形成される。Eddystone の巨大な蒸気管を 600,000~2,000,000 lb/hr の速度で通って、巨大な複合タービンを運転する”⁴⁾。

蒸気の純度が高いから、この厳しい条件の下でも高い耐食性が維持されなければならない。よって管材の契約者はこの高圧、高温状態に最も適当な材料を見出すため徹底的な試験を行なった。

“Kellogg の金属学者は超高温高温状態の使用に適すると思われるすべての高合金鋼、超高張力鋼について検討を加えた。Eddystone 施設の他の主要契約者である Philadelphia 電気会社の技師、アメリカ、イギリス、ドイツ等のオーステナイト系および超高張力合金の製造業者を含む内外の専門家等の意見を徴した。

動力装置用管材材料は使用状態の厳しい条件に耐える性質を持つことは当然必要であるが、同様に重要なことは製造および組立の厳しい条件にも耐えることである。実

際のおよび経済的な観点から、材料は組立てることができる、しかもなお使用状態の要求に耐える性質を持っていることが最も大切である。

多数の合金が考えられた中で 5 合金について厳しい試験を行なった。これらはオーステナイト・ステンレス鋼の 347 および 316、超高張力鋼の 15-15 N, 17-14 Cu Mo と G 18 B で Kellogg 金属研究所で徹底的な試験を行なった。

Kellogg 金属研究所の試験の結果 316 ステンレス鋼を主蒸気管装置用材料に選定した。この鋼は Code に決められた材料で許容範囲の S 値を 1,200°F でもっているから合理的な管の肉厚とすることができる⁴⁾。

Eddystone 発電所のようにきわめて大きな新しい超高温高温動力装置が、一般の超高温高温でない全国的な蒸気施設もまた高純度の水を必要とすることを忘れさせないようにしなければならない。そのような一般的の施設でも Eddystone のように巨大な超高温高温の場合と同様に、高圧給水加熱器用管にモネルニッケル銅合金を使用して多年金属汚濁の基準を超過することなく成功をおさめている。

最近の 10 年間に発達した新しい水の清浄法、改善されたイオン交換樹脂、すぐれた処理装置等を十分に活用することによって、 $18 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ 程度の高い電気抵抗をもった水が常に十分に得られるようになった。こんな大規模に高純度の水が得られることは実になまやさしい成功ではない。このような高純度の水は水晶槽を用いて実験所で数回蒸留した昔の高純度水より数等純度が高いからである。

6. 原子動力用の水

原子動力装置では純水に対する要求は一般の動力装置よりも一層切実なものがある。しかし作られた水の使用法はいずれの場合も全く類似している。原子核分裂によって発生したエネルギーを動力装置に利用する現行の唯一の方法は水のような作動液体を加熱して従来の通りの蒸気サイクルで作動させる方法である。原子炉はどんな型式でも普通の動力装置の炉の代りをする熱源である。化石燃料を使用するものよりも原子炉は一層高い温度、一層集中した動力源を得ることが理論的に可能である。これらの因子と放射能や分裂生成物の問題は構成材料に対して一層厳しく極端な条件を要求する。

これに使用する金属および非金属材料の腐食と損耗の多数の試験資料が、アメリカ原子力委員会および若干の私設工場との契約および監督下に、内外の各研究所で集められた。これらの研究の大部分は主として水を原子動力装置の冷却剤および熱伝導媒体として使用する状態での構成材料の性能を決めるために行なわれた。熱伝導媒体として高純度の水が原子炉を循環して熱を受入れ、次

いで熱交換器を通過して通常の蒸気装置のボイラ給水を加熱する。これらの研究の大部分は温度 500~600°F, 圧力 2,000 psi までの水中で行なわれたが, ある試験は 250°F の低い温度, 680°F の高い温度でも行なわれた。

このような装置における水に対する特別の要求は, 溶解あるいは含有固形分がきわめて低いことで, もし固形分が存在すれば原子炉の中で放射能を受け入れ, 熱交換器にこの放射能を移すからである。

他の要求は, 水と接触する構成材料は腐食や損耗のないことであって, もしそれがあれば冷却剤の流れの中に有害な量の金属イオンや粒子が入りあるいは機械的装置の操作を害するかも知れない。活性化された腐食生成物の蓄積は深刻な健康障害を起こすかも知れないので, 装置の保守修理を非常に複雑な問題とする。カナダ原子力会社の Chalk River 工場ではこの種の研究にすぐれた数字を出し, 各種構成材料の放射能抵抗に関するわれわれの知識に貢献することが大きかった。

明らかにこの非常に苛酷な要求は専ら原子力装置に適用されるものであろう。しかし腐食や損耗の資料や現在作動している装置で得られた実用経験は各種の非核応用方面で高度の純水を使用する他の産業にも相当応用し得るであろう。

この仕事に関する水の純度を得るには繰り返し蒸留あるいはイオン交換樹脂による浄化で作ることができる。高いイオン純度が要求されるときは, 大量の水を処理する場合には脱イオン処理の方が蒸留法より安いように思われる。もちろん核動力発展段階にある現在では最低経費は最高の安全考慮の下に位するとは納得できる。従って各種の清浄方法が混用されて最大の信頼をおけるようにするのが普通である。たとえば統合 Edison 社の Indian Point の原子力発電所ではあらゆる水処理が計画されている。すなわち陽イオン交換による軟化処理, 蒸発, 混床脱イオン処理, 炭酸ガス除去のための脱炭酸塩処理が相次いで行なわれ最後にいわゆる“ゼロ処理”と呼ばれるヒドラジンによる処理を行なう。この処理によってボイラ水中の酸素濃度は実質的に 0 となる。

7. 構成材料

核装置の高純度水用の耐食合金の選択理由を統合 Edison 社の A. C. Muller は次のように簡単に要約している。

一次冷却材と接触する構成材料は装置中に放射能が過剰に蓄積しないために腐食を最小にするように選択しなければならない。ジルカロイ製のフオロアーをもったハフニウムの制御棒, ジルカロイ製の燃料被覆材以外は循環水と接触する唯一の材料はステンレス鋼 304 である。

これは全般腐食および堆積物の蓄積問題については満

足すべき解答であるがステンレス鋼は高圧高温下で微小の塩素イオンと酸素を含んでいる環境では非常に応力腐食亀裂を生じ易い重大な問題がある。これが Indian Point の施設で極端に純粋な水を必要とする主要な理由である。反面に高純度の水はステンレス鋼に応力腐食を起こさない実験的証拠がある。このことは超高圧高温の貫流ボイラでゼロ処理した水を使用すればステンレス鋼になんらの損傷も生じないことで実際に確認された⁵⁾。

反応炉冷却用の純度の高い高温高圧の水はかなり腐食性の媒体であるが, 適当な pH 調節と酸素濃度, 溶解固形物の含有量を十分低く保てばその腐食作用は十分に最小にすることができて, 冷却装置の設計も満足にできることが実験室研究でも実用の経験からも明瞭となった。

構成材料の中で必要な原子核要求に合致し, 適当な高温の機械的強度を持ち耐食性である材料はステンレス鋼, ジルコニウム合金とある種のニッケル基の合金である。オーステナイト・ステンレス鋼の 18Cr-8Ni の型が一次冷却装置の内部管装置と熱交換器管の構成材料, 反応炉内壁のクラッド材料とし圧倒的に多く用いられている。これらのステンレス鋼は燃料容器またはクラッド材料としても使用し得るが原子核の観点から見ればジルコニウム合金の方がこれらの用途にはより適当である。オーステナイト・ステンレス鋼の全面腐食はきわめて小さく, 装置の耐用年数から考えればほとんど問題とならぬ程度である。

しかし前に述べたように, これらはひどい局部腐食を受け易い。塩素イオンは特別に有害である。塩素イオンは二次ボイラ水中には入る可能性があり特に冷却水に海水を用いる場合はその可能性が強い。水道水や高純度の水を使用する場合でも, 塩化物は乾湿を交互に繰り返す帯域の隙間に徐々に蓄積されることもある。塩化物のあるとき, これに酸素と残留応力あるいは適用応力が加わればオーステナイト・ステンレス鋼の応力腐食亀裂を招く。

この理由から近來圧力水反応炉装置の熱交換器用管材としてインコネルニッケルクロム合金*の使用が考慮されるようになった。Battle Memorial 学会⁶⁾を含む各原子力研究所で最近行なわれた研究は, インコネルは人工冷却水および高温高圧のボイラ水中で応力腐食亀裂に非常に強いことを示している。

水冷式反応炉の重要な部品は制御棒の駆動装置である。熱水および蒸気的环境中で各種の温度, 圧力の下で満足な作動をしなければならないから, この駆動装置計画上の重要な問題の一つは腐食である。この問題は次のような耐食材料の使用によって解決されている。すなわち軸, バックリング, ガイドローラーその他の摩耗部分には析出硬化型ステンレス鋼, 指針脚, 一次冷却水ポンプ

* International Nickel Co., Inc. の商標

の軸受、弁装置にはステライト、パネにはインコネル“X”時効硬化性ニッケルクロム合金などである。

これらを総合してオーステナイト・ステンレス鋼はこのような応用方面に多くの利点を持っていて非常に広範に使用されている。高純度の水中におけるこれらの腐食率は非常に低く、ニッケルおよび高ニッケル合金の腐食率に匹敵し得るものである。構造上の見地からはこれらはいずれも損耗は無視し得る程度である。またこれらの材料はかなり密着性の良い曇った皮膜を作り、加圧水型原子炉の高純度水にほとんど有害な腐食生成物を与えないので価値がある。

8. 飢えた水他方面への応用

蒸留あるいは脱イオンした水のさまざまな用途については余多く述べる余裕はないが、それは皆処理作業中純度を維持する問題がある。多くの大きな研究所では $1\ \mu\Omega\text{-cm}$ 以下の電導度の脱鉱物処理をした水を相当多量に使用する。有機物を含まない蒸留水も要求され、両方の型の水が実験所で用いられることもある。Skold と Wilkes⁷⁾ は大きな総合実験所の混床脱鉱物施設について述べている。作動時間の 95% の期間は電導度約 $0.06\ \mu\Omega\text{-cm}$ の水が得られ、再生用の中間抽出水は $1\ \mu\Omega\text{-cm}$ である。

テレビ管の製造者は管の予備洗浄用および磷コーティングの定着および洗浄用に高度の純水を必要とする。ごく微量の不純物、特に洗浄水の珪素は磷コーティングに条痕を生じ、映像に欠陥を作ることがある。銅は青い色をつけるから $1\sim 2\text{ppb}$ 以下としなければならない。鉄は褐色の点を生ずる。水はイオン交換によって脱鉱物され、ある工場では中間品でも $1\ \mu\Omega\text{-cm}$ である。水中の溶存ガスは磷コーティングに気孔を作るおそれがあるから脱気処理が必要である。ある工場では 316 ステンレス鋼製の微小戸過器と管を用いている。水は劣化を防ぐため浄化するとすぐに使用されるのが普通である。

トランジスターの製造には高度の純水が絶対に必要である。わずかな不純物が重要性能に害を与えるからである。上に述べたのと同様の浄化装置によって純水は得られる。これをステンレス製の管装置によって混床樹脂装置に導き最後の仕上げを行なう。最後の出口の水は $0.2\ \mu\Omega\text{-cm}$ 以下の電導度で、 $0.05\ \mu\Omega\text{-cm}$ のような低い電導度のものも得られる。これらはよく装置から出たものを直接トランジスターや電子装置の関連精密部品の清洗に用いられる。

これらより若干低い純度の水でも良い産業においては、製薬業で高純度の水を多く使用する。薬品の純度を高め洗浄すること、特許薬、薬品、防腐剤の製造、アンブルの洗浄に使用される。U. S. P. 規格では全溶解固形分を 5 ppm 以下と規定しているが、たぶん多くの薬品

用としてはこれで十分である。

高純度の水は写真産業にも必要で、フィルム紙やゼラチンの製造やフィルム処理に用いられるが、多くの場合電導度を $2\ \mu\Omega\text{-cm}$ より小さくする必要はない。映画の天然色フィルム製造に必要な染料の混合に使用される水は溶解塩類や珪素の合計含量 5 ppm 以下のものである。色の複製が最も重要であるが、高純度の水は使用水によって色があせる欠点を防止する。高純度の水は精度の高いレンズの洗浄用としても必要である。

パルプや紙の産業でも高級紙やセルロースの製造に高純度の水を使用する。多くの場合溶解塩類は 5 ppm より少なくはないが、約 $0.25\ \mu\Omega\text{-cm}$ の電導度をもつ水が高い抵抗を持つ絶縁紙の製造に用いられている。

ある種の陶器を焼く前の洗浄に 5 ppm 以下の溶解塩類の水が使用される。多量の溶解塩類を含む水を使用すれば焼上った陶器の表面に斑点や縞ができることがある。

陶器エナメル工場では多量の溶解固形分を含む水はエナメルの作業性に悪い影響を与える。このような水をミルの添加物として用いればエナメルに一時的の歪を与えこれを用いると形状が狂うからである。このような害は高純度の水を使用すればなくすることができる。

メッキ工場ではメッキ液の製造、メッキ後の製品洗浄に高純度の水が用いられる。塩化物は青化亜鉛メッキ液に有害で、塩化物、硫化物、炭酸化物等は銀メッキに有害であるから脱イオン、脱炭酸した水が用いられる。アルミニウムの陽極処理にも高純度の水が望ましい。でなければ塩化物や硫化物が蒸発によって蓄積されて許容限度を超えるようになる。蒸留水に匹敵する水が鏡の銀メッキに必要である。これには塩化物の含量を 1 ppm 以下に保つ必要がある。硝酸銀アンモニアメッキ液製造用および鏡の洗浄には清浄処理した水が使用される。

ほとんどイオン除去した水は大変通常の平衡状態に帰り易い。脱気した水を空気に接触させれば酸素や炭酸ガスと強い親和力を持っている。本紙に述べた応用の大部分はボイラや給水の場合を除き 200°F 以下の水を取り扱う。にもかかわらず金属イオンを取り入れるのを防止するのに相当の努力が必要である。ある施設ではイオン交換装置から出る水はゴム内張りあるいは樹脂内張りした管路、バルブ、ポンプ等で取り扱われている。

オーステナイト・ステンレス鋼は多数のこれら応用方面で満足すべき成績を収めている。テレビ管製造業および醸造所を含む数工場では、304 および 316 ステンレス鋼が脱イオンした高純度水を取り扱う全装置に用いられている。これらには管路、バルブ、貯蔵タンク等が含まれている。ある工場では 304 ステンレス鋼の内張りをした貯蔵タンクが数種の合成樹脂の被覆をしたものよりも

好成绩を得られた。他の場合にステンレス鋼製筒型バルブが黄銅バルブが腐食する脱イオン用水管路に使用された。モネルやインコネルは貯蔵タンク内張りに使用されて好成绩を収めている。ある工場ではガラス内張りタンクが珪素で汚損され、ゴム内張りタンクが使用中損傷した場合にモネルメタル*内張り鋼製タンクに取り換えた。

高純度水に対する産業上の要求が増加を続け、多数の応用方面では 600°F まであるいはそれ以上の高温の水が要求されるのは疑う余地がないように思われる。最近までこのような問題について腐食および損耗の資料は余り得られなかった。現在では多数の研究が刊行されている。設計上および操作上の資料が得易くなったことは、工場技術者がそれぞれの産業における操作を改善するため高純度の水の使用を考慮する上に好刺激を与えるである。

付 記

原子力発電所は高純度の水について古い問題の上に新しい目立った問題を加えた。この問題およびその解決法に興味を持たれる読者のため次の権威ある文献の複写が用意してある (INCO)。

W. Z. Friend: "Corrosion Problems in Nuclear

* International Nickel Co., Inc. の商標

技術トピック

水滴の潰食効果

Westinghouse 社で音速の3倍以上の速度で水滴の弾丸を鋼板上に発射して試験を行なった。水滴は速度 3,400 mile/hr で衝突し薄い金属板を小銃弾のように貫通した。水滴は厚い銅板、ステンレス鋼等に目で見える凹みを作った。水滴が金属板に衝突する際肉眼で見える光を発した。この実験の目的は高速回転のタービン翼に対する高速水の影響を研究するにあった。長期間の間に水滴はタービン翼を潰食してきた。同様の潰食が雨中を高速で飛ぶ飛行機やミサイルに生じた。飛行機や機械の速度が次第に速くなるので水滴潰食の重要性はますます大きくなって行く。このことは将来の設計工作上留意を要する点である。水滴潰食は蒸気タービンの低圧部で起こる。高温高圧の蒸気はガス状でタービンに入るが、タービン内通過中冷却して蒸気から小さな水滴を生ずる。この水滴はタービン翼が最も長く超音速で動いている部分で生じ、タービン翼の潰食を生ずる。この基本的な過程を理解することによって水滴潰食を防止し、より効率の高いタービンを作ることができる。

超音速の水弾は圧縮空気で作られ、空気銃で発射される。小さな鉛弾が長さ 30 in の金属管を通して 150 lb/

Reactor Power Stations"

H. R. Copson & W. E. Berry: "Qualification of Inconel Nickel-Chromium Alloy for Nuclear Power Plant Applications"

文 献

- 1) 詩人 John Ball はアダムが穴を掘りイブが紡ぐと伝えているが、エデンを流れる太古の水の中でしばしの憩いの間泳ぐことはありそうなおことである。特にその当時布の需要はほとんどなかったであろうからである。
- 2) われわれは"ゼロ処理"と呼ばれるきわめて激しい方法を取っているにかかわらずこのことは事実として残る。その方法では初め良質の水道水を陽イオン交換、軟化、蒸留、混床脱イオン、炭酸塩除去を逐次行ない最後にヒドラジン処理によって残った微量の酸素を除去する。
- 3) E. B. Morris & E. F. Ruth: "Chemistry Influence Philo Design", *Electrical World*, p. 93, Apr. 16, 1956 (E. B. Morris からの最近の通信によれば 70-30 キュプロニッケルは Philo 復水器と低圧加熱器では現在なお好成绩であるが、高圧加熱器では銅の混入量が高いため Philo 技術者は他の耐食性材料を用いて試験しているとのことである)。
- 4) "The Eddystone Story", M. W. Kellogg Co. 発行 (1959)
- 5) A. C. Muller: "Water Treatment at Indian Point Nuclear Plant", *Ind. Eng. Chem.*, 51, Oct. (1959)
- 6) H. R. Copson & W. E. Berry: "Qualification of Inconel Nickel-Chromium Alloy for Nuclear Power Plant Applications", *Corrosion*, 16, (1960) Mar.
- 7) R. V. Skold & J. F. Wilkes: *Ind. Eng. Chem.*, 47, 90~96 (1955)

in² の圧力で発射される。鉛弾は標的の金属板に向いた小さな孔のあいている密封した水の容器に衝撃を与える。鉛弾が当たると水を圧縮し長さ 1 in の隙間を通して金属板に水滴を発射する。水滴は 1,500 万分の 1 秒で標的に達する。その状況を 500 万分の 1 秒の間隔で高速度カメラで撮影した。水滴が金属板を打った際特殊の光が発生し撮影された。光の継続時間は 100 万分の 1 秒以下である。なぜ光を発するかはまだ明らかでない。金属表面を調べたところ、隕石が巨大なエネルギーで大地に衝突したときに生ずる孔と同様の孔を生じていた。潰食量を数量的に測る工夫をしている。試験した金属中ではステライト、炭化タングステンが水撃に最も強い抵抗力を示した。この実験で判明した他の科学的資料は次の通り。(1) 均一な水流は不規則な水流より大きな傷害を与える。(2) 金属表面の不規則さは潰食に余り影響しない。(3) 金属表面上の油膜や水膜は金属を潰食から保護しない。(4) 金属表面の損傷状況は蒸気タービン翼に起こる損傷の起こり始めの状況に似ている。もし実験と実際の損傷状況との相関性が問題なく確認されるならばこの新しい水弾による試験法は将来迅速、簡単、廉価なタービン翼用の耐潰食材料検査方法となるであろう。

Corr. Prev. Contr., 8, No. 9, 36, 44 (1961) Sept. (E. F.)