

水車材料の最近の進歩

The Recent Technical Progress of Materials for Hydraulic Turbines

藤 間 孝 義*
Takayoshi Tōma

内 容 梗 概

最近水車要部の構成材料としてステンレス鋼が大幅に採用されるようになり、その損耗軽減に著しい効果をあげているが、ここでは水車用金属材料の損耗や材料的な対策を中心として、問題の現象的な理解や材料選定に関係のある最近の研究や技術的な進歩について概観するとともに、残された問題点についても言及した。

1. 緒 言

戦後わが国の電源開発は電力需要の急増に伴って異常な発展を遂げ、高性能の大容量新鋭火力発電所の建設が盛んになるとともに、水力開発の方向にも水車の大容量大形化、揚水方式の開発、筒形および斜流水車の開発などの新しい傾向を生じ、さらに躍進を続けようとしているが、この躍進の陰に性能、構造から材料にわたる広汎な研究と技術の進歩が大きな役割を果していることは周知のとおりである。

日立製作所においても明治45年に224 kW 横軸ペルトン水車およびこれに直結する250 kVA 交流発電機を製作して以来、日立独自の技術を目指して精進を続け、いくたの記録的な製品を完成してきたが、ここでは水車材料の損耗と材料的な対策の問題を中心に、最近の研究と技術的な進歩について述べてみたい。

2. 水車材料の問題点

“水車は刻々食われている”という言葉で端的に表現されるように、運転中の水車要部は流水中の土砂による摩耗、キャビテーションによる潰食、河川水質による腐食などの交錯した複雑な条件のもとで損耗し、その効率は逐次低下している。

国内の鋳鋼製ランナを有する水車114台についての最近の調査によれば、1年当りの効率低下が1%以内のもの52.5%、1~2%のもの29.8%、2%以上のもので17.7%といわれている。したがって、すぐれた設計によって高い効率を競うことももちろん大切ではあるが、そのすぐれた性能を長期にわたり維持するための材料の質的な改善についての努力もこれに劣らず重要な問題である。

この要部の損耗と材料的な対策の問題は古くより水力機械関係技術者の重要な関心事であったが、戦後水車の大容量大形化とともに以前にも増して重視されるようになり、それぞれの要因による損耗と対策に関する基礎的な並びに技術的な研究が急激に活発化する一方、その研究成果を採り入れた設計が積極的に試みられるようになり、水車材料の信頼性は逐次向上しつつある。

3. 最近の日立大形水車

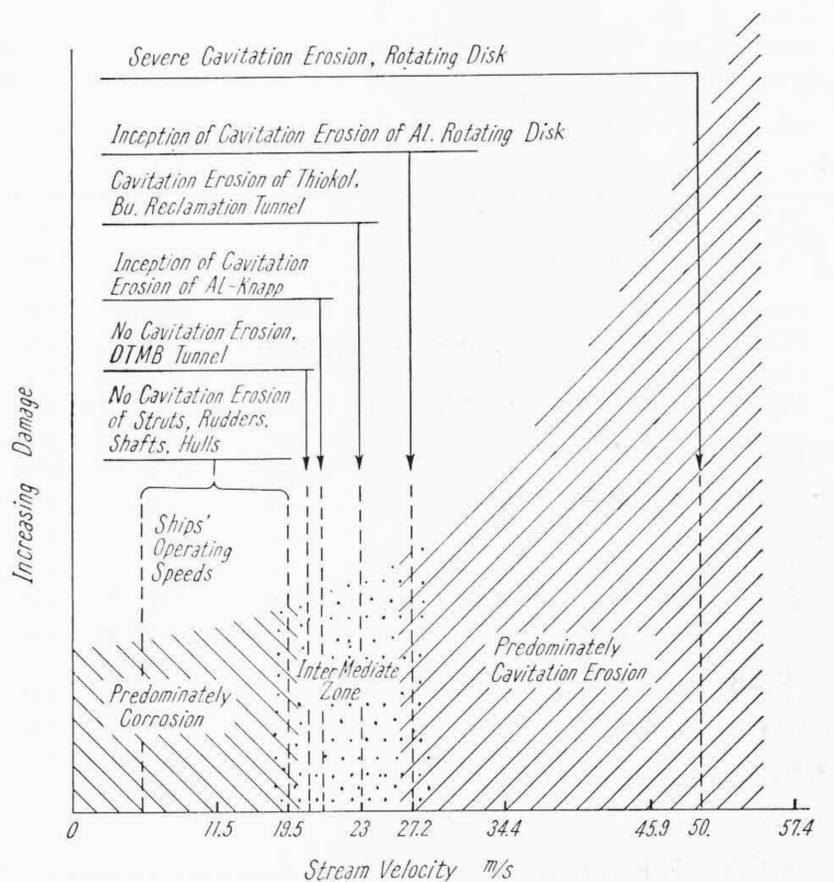
第1~3表は最近の日立大形水車とその要部の材料を表示したもので、水車の性能を左右する要部にステンレス鋼が大幅に採用されるようになったことは注目すべきである。

4. キャビテーション

4.1 キャビテーションによる潰食

キャビテーションによる水車要部の損傷はキャビテーション・エロージョン、潰食、あるいは壊食とよばれ、その強さが水車の設計的

* 日立製作所日立研究所



第1図 水速と腐食およびキャビテーション損傷の関係⁽¹¹⁾

な条件によって軽減できることはよく知られているが、水車の高速化、小形化についての技術的な要求や水車の基礎掘さく量逡減についての経済的な要求は、これと対立する要件であって、設計技術の進歩とともにますます累加されるものであるから、キャビテーション問題は水車から切り放して考えることのできない宿命的なものである。したがってこの対立する要件の調整にはつぎの二つの考え方があ

(1) 性能重点主義で水車を設計し、なお発生する多少の障害は材料の耐キャビテーション性に期待してこれを軽減する。

(2) 効率を多少犠牲にしてもキャビテーションによる障害防止に万全を期した設計とする。

最近内外ともに金属材料の耐キャビテーション性についての関心^{(1)~(6)}が昂まっております、水車要部に好んでステンレス鋼が用いられるようになったことは、主として前者の考え方が支持されてきたことのあらわれと考えられる。

またキャビテーションによる損傷機構についても種々な角度から活発な研究^{(7)~(9)}が行われてきたが、現在なお疲労とか塑性変形などの機械的な機構を主張する説と広義の化学的な機構を主張する説とが対立⁽⁴⁾⁽⁵⁾した形をとっている。一般的には腐食による疲れ限低下⁽¹⁰⁾のような現象も考えられるので、両者の作用が重畳して存在するとする見方が支配的があるが、要は対象とする条件における両者の強さの程度が問題と思われる。第1図は J. Z. Lichtman⁽¹¹⁾ら

第 1 表 日立大形フランシス水車 (30,000 kW 以上)

| 製作年度 | 納 先 | 発 電 所 | kW | H (m) | N (rpm) | 台 数 | 主 要 部 の 材 料 | | | |
|--------------|-------|-----------|---------|-------|---------|-----|-------------|-------|-------------|--------------|
| | | | | | | | ランナ | ランナ肉盛 | ライナ類 | ケーシング |
| 1937 | 国 鉄 | 千 手 | 44,700 | 58 | 150 | 5 | 铸 鋼 | — | 鋼 板 | 鋼板リベット |
| 1943 | 中 国 | 松 花 江 | 85,000 | 69 | 125 | 2 | 铸 鋼 | — | 鋼 板 | 鋼板リベット |
| 1944 | 朝 鮮 | 江 界 第 一 | 46,000 | 380 | 514 | 2 | 铸 鋼 | — | 鋼 板 | 铸 鋼 |
| 1953 | 陸 電 | 神 通 第 一 | 48,000 | 65 | 172 | 2 | 13 Cr 铸鋼 | 18-8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1954 | 関 電 | 丸 山 | 70,000 | 80.7 | 164 | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 18-8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1955 | 電 発 | 佐 久 間 | 100,000 | 135 | 167/200 | 2 | 铸 鋼 | 17-7鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1955 1957 | 東 北 電 | 八 久 和 | 32,000 | 267.6 | 500 | 2 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1957 | 中 電 | 井 川 | 33,000 | 89.6 | 214/257 | 2 | 铸 鋼 | 13 8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1958 | 陸 電 | 新 中 知 山 | 40,200 | 273.2 | 450 | 2 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1959 | イ ソ ド | バ ー ク ラ | 112,000 | 156 | 167 | 5 | 铸 鋼 | 13 8鋼 | 13 Cr-SC-45 | 鋼板熔接, フランジ接続 |
| 1959 | 電 発 | 御 母 衣 | 137,500 | 200 | 225 | 2 | 铸 鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板熔接, フランジ接続 |
| 1959 | 中 国 電 | 滝 山 川 | 53,200 | 314.4 | 450 | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1960 | 九 電 | 諸 塚 | 54,000 | 226 | 300 | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1960 | 四 電 | 広 野 | 35,800 | 286 | 514 | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 13 8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 製作中 | イ ラ ン | デ ス | 103,800 | 180 | 250 | 2 | 铸 鋼 | 13-8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 製作中 | タ イ | ブ ミ ボ ー ル | 84,700 | 123.2 | 150 | 2 | 铸 鋼 | 18-8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |

第 2 表 日立大形カプラン水車 (10,000 kW 以上)

| 製作年度 | 納 先 | 発 電 所 | kW | H (m) | N (rpm) | 形 式 | 台 数 | 主 要 部 の 材 料 | | | |
|------|---------|-----------|--------|--------|---------|-----|-----|-------------|-------|---------|----------|
| | | | | | | | | ランナ | ランナ肉盛 | ライナ | ケーシング |
| 1939 | 漢 江 水 電 | 清 平 | 21,000 | 26.5 | 164 | K | 2 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1952 | 東 北 電 | 片 門 | 22,500 | 20.0 | 125 | K | 2 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | (コンクリート) |
| 1952 | 北 電 | 班 溪 | 10,600 | 34.1 | 150 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | (コンクリート) |
| 1952 | 九 電 | 夜 明 | 12,700 | 199.65 | 164 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1953 | 東 北 電 | 本 名 | 30,000 | 36.1 | 167 | K | 2 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1954 | 中 電 | 姫 川 第 三 | 13,000 | 55.0 | 333/400 | K | 1 | 18-8 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1956 | 関 電 | 殿 山 | 17,000 | 71.0 | 400 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1957 | 北 電 | 岩 知 志 | 14,500 | 59.0 | 375 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 18 8鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1958 | 東 北 電 | 上 野 尻 | 21,000 | 15.1 | 115 | K | 3 | 13 Cr 铸鋼 | 17-7鋼 | 13 Cr 鋼 | (コンクリート) |
| 1959 | 熊 本 県 電 | 市 房 第 一 | 15,800 | 73.35 | 400 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼 板 熔 接 |
| 1959 | 高 知 県 電 | 杉 田 | 12,000 | 35.12 | 300 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 17-7鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1959 | 東 北 電 | 本 名 (増 設) | 30,000 | 31.6 | 167 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1960 | イ ソ ド | ヒ ラ ク ッ ト | 38,800 | 36.3 | 150 | K | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 17-7鋼 | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1960 | イ ソ ド | カ ン グ ワ ル | 29,840 | 30.5 | 167 | P F | 1 | 铸 鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |
| 1960 | イ ソ ド | コ ト ラ | 29,840 | 30.5 | 167 | P F | 1 | 铸 鋼 | — | 13 Cr 鋼 | 鋼板リベット |

第 3 表 日立大形ペルトン水車 (8,000 kW 以上)

| 製作年度 | 納 先 | 発 電 所 | kW | H (m) | N (rpm) | 形 式 | 台 数 | 主 要 部 の 材 料 | | |
|------|---------|-------------|--------|-------|---------|-----------------------------------|-----|-------------|---------|-------------|
| | | | | | | | | ランナ | ケーシング | |
| 1927 | 陸 電 | 真 川 | 13,900 | 518 | 450 | P ₁ N ₂ -H | 1 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1936 | 東 電 | 一 ノ 瀬 | 13,000 | 279.5 | 429 | 2P ₁ N ₂ -H | 1 | 铸 鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1936 | 中 電 | 豊 | 8,000 | 304 | 333/400 | P ₁ N ₂ -H | 2 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1940 | 台 湾 電 力 | 霧 社 第 一 | 16,500 | 275 | 300 | 2P ₁ N ₂ -H | 1 | 铸 鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1951 | 北 電 | 然 別 第 二 | 14,000 | 263.3 | 375 | 2P ₁ N ₂ -H | 1 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1952 | 四 電 | 松 尾 川 第 一 | 21,100 | 375 | 450 | 2P ₁ N ₂ -H | 1 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1952 | 四 電 | 松 尾 川 第 二 | 22,100 | 395.4 | 450 | 2P ₁ N ₂ -H | 1 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1952 | 東 電 | 白 根 | 12,000 | 203.7 | 300 | P ₁ N ₄ -V | 1 | 13 Cr 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1952 | 東 電 | 田 代 川 第 二 | 11,930 | 503 | 500 | P ₁ N ₂ -H | 1 | 低 Mn 铸鋼 | ボルト締め | 铸 鋼 |
| 1953 | 東 電 | 早 川 第 一 | 9,200 | 215 | 375 | 2P ₁ N ₂ -H | 3 | 低 Mn 铸鋼 | 一 体 铸 造 | 铸 鋼 |
| 1954 | アルゼンチン | リ オ コ ラ リ ト | 8,000 | 292 | 375 | P ₁ N ₂ -H | 2 | 低 Mn 铸鋼 | 一 体 铸 造 | 铸 鋼 |
| 1958 | ビ ル マ | バ ル ー チ ャ ン | 29,840 | 423.7 | 428.5 | 2P ₁ N ₂ -H | 3 | 13 Cr 铸鋼 | 一 体 铸 造 | 铸 鋼 |
| 製作中 | 関 電 | 黒 部 第 四 | 98,400 | 580 | 300/360 | P ₁ N ₆ -V | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 一 体 铸 造 | 特殊铸鋼および高張力鋼 |
| 製作中 | 昭 電 | 三 峰 川 第 二 | 9,200 | 300 | 541/429 | P ₁ N ₄ -V | 1 | 13 Cr 铸鋼 | 一 体 铸 造 | 铸 鋼 |

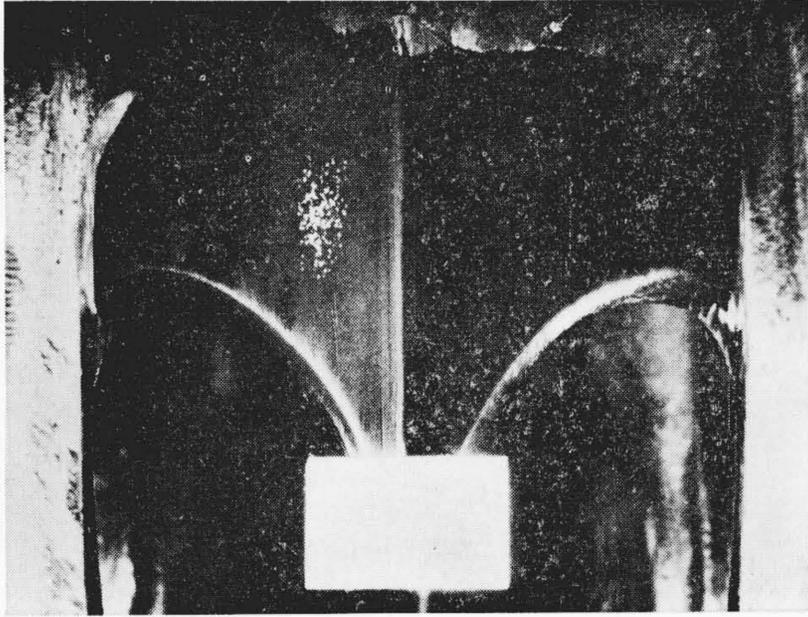
によってまとめられた水速と両者との関係を示す。水車における水速はこのキャビテーション、エロージョン優位の領域に属しており、形式、設計条件によって著しく異なるが、もちろんペルトン水車で 180 m/s に達する記録的なものも知られている。この水速の条件は水車の設計技術の進歩とともに全般的に逐次過酷な方向へと進んでおり、高速領域で発生する強いキャビテーションでは合成樹脂、ガラスそのほかの絶縁材料^{(11)~(13)}も金属材料と同様に損傷される。

最近キャビテーション損傷に対する電気化学的な防食法の効果が論議されているが、これはキャビテーションによる腐食の流動電極的な加速効果の軽減にその効果を期待できる程度のもので、コンデ

ンサーチューブのインレットアタックなどには有効であるが、機械的な作用を主とする最近の高性能水車のキャビテーションに対しては、実質的な効果はほとんど期待できないと考えられる。

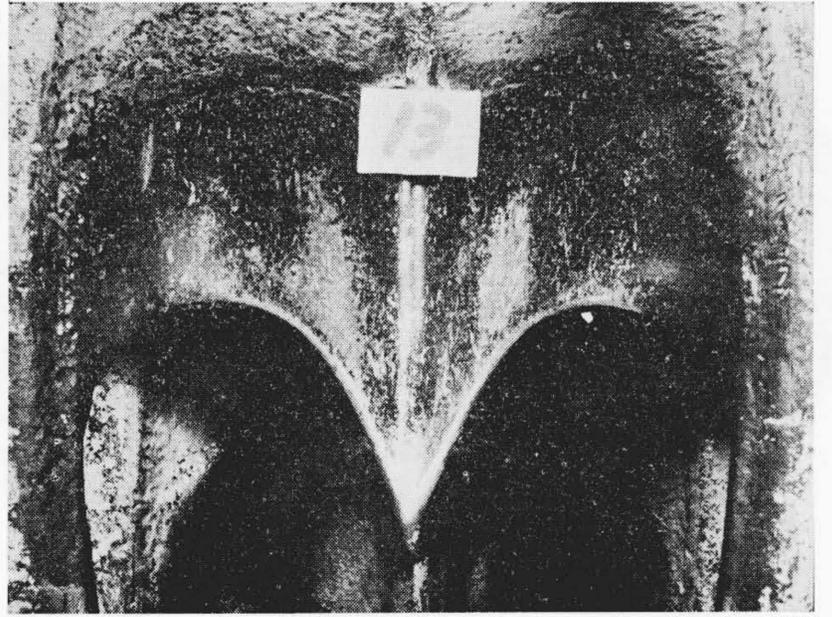
水車の材料面でのキャビテーション対策を講ずるには、用材のキャビテーションに対する相対的な強さ（以下耐キャビテーション性と略称する）を知る必要があるが、同時に水車の損傷位置と損傷に関与するキャビテーションの強さを、翼の形状や運転条件との関連のもとに予知する必要がある。

この検出法に関する研究は比較的少なく、現在もっぱらモデル試験における視察や写真的な記録を利用する方法が採用されているが、この方法では細部の観察が制約される上に、キャビテーション



有効落差 75 m 試験時間 30 min

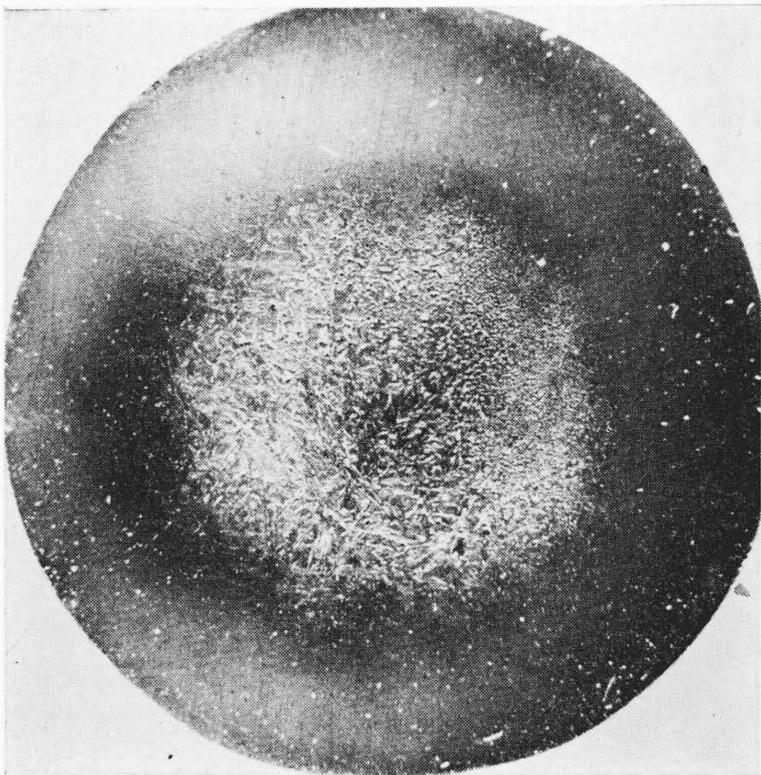
(a) モデル水車バケット背面



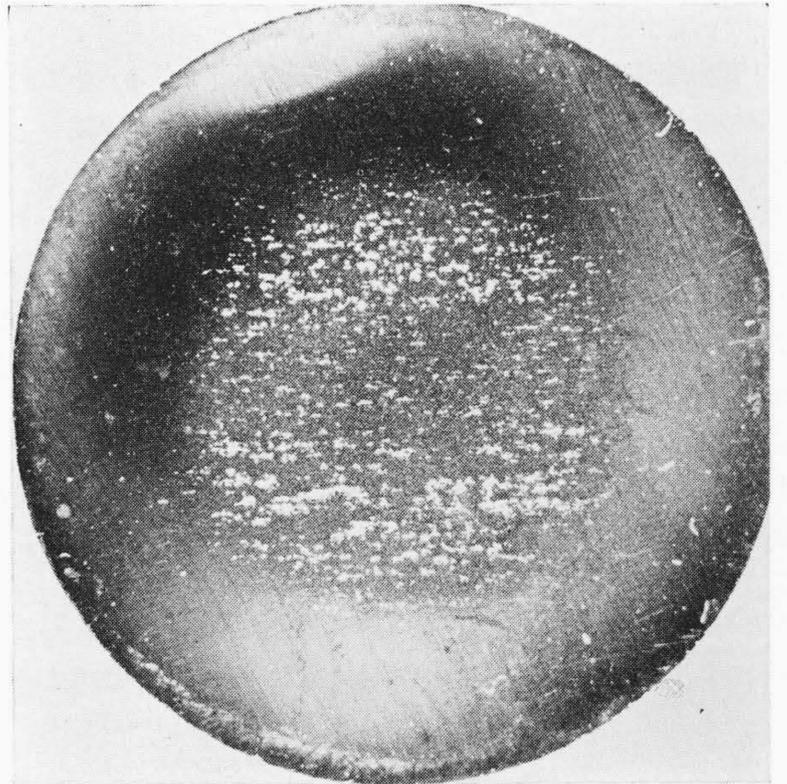
有効落差 169m 試験時間 5 min 試験出力 2,000kW

(b) 出力 2,200 kW のペルトン水車バケット背面

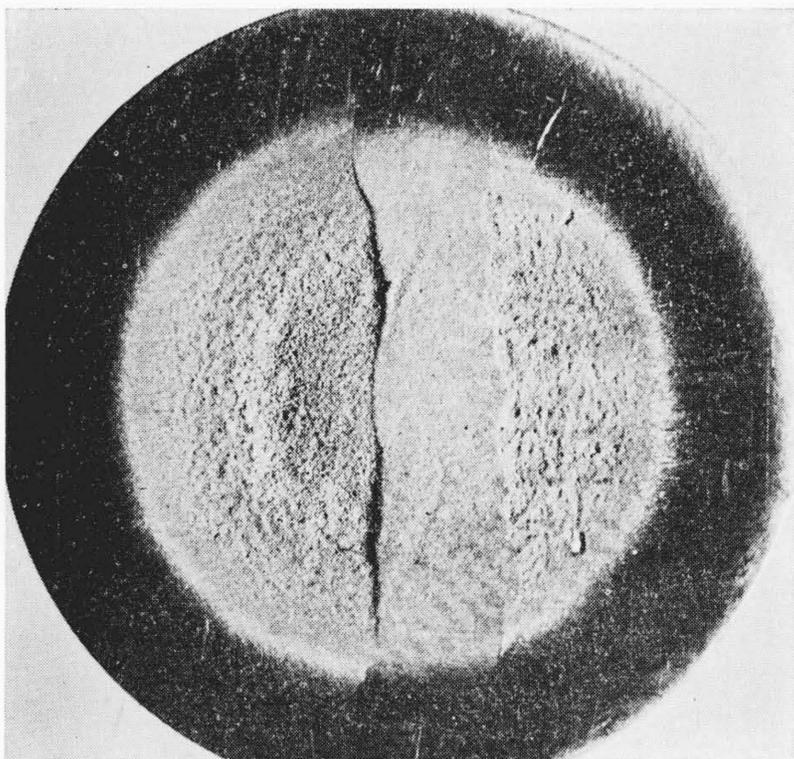
第 2 図 特殊塗料によるキャビテーションの検出例試験



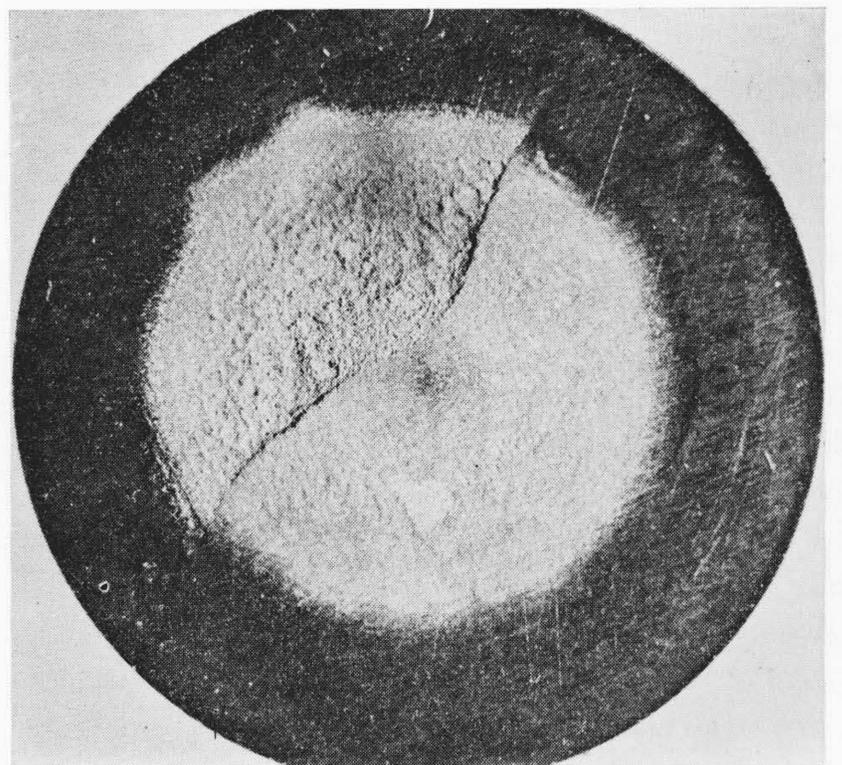
(a) ステライト (精密鑄造) Ser No.609



(b) ステライト (圧延材) Ser No.471

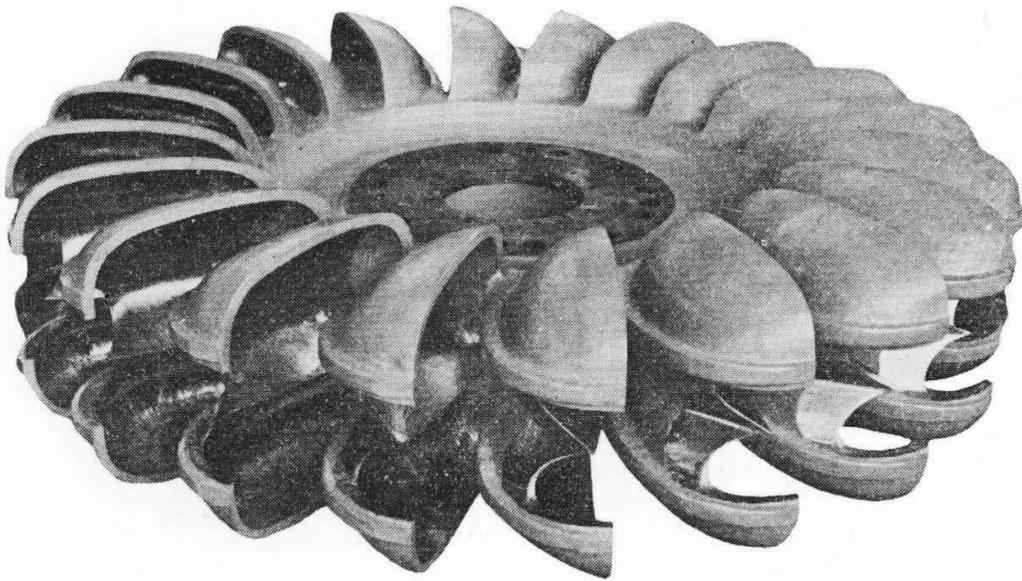


(c) 13Cr (鑄)+18-8(熔) Ser No.175



(d) 18-8 (鑄)+17-7(熔) Ser No.176

第 3 図 磁歪振動式キャビテーション試験法による試験片の潰食例



第 4 図 98,400 kW ペルトン水車ランナ

でおおわれた個所と損傷個所とは一般に一致せず、また強さについてなんらの手がかりも与えない点に本質的な問題がある。

そこで最近ではキャビテーションの発する超音波のスペクトラム⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾や特殊塗料⁽¹⁶⁾などを手がかりとして、キャビテーションの強さや発生位置を検出しようとする研究も行われている。第 2 図は特殊塗料を用いて筆者らの行ったキャビテーション検出試験の一例を示すが、強さの異なる塗料を用いることによってキャビテーションの強さの検知も可能であることが確かめられており、塗料のキャビテーションに対する強さの検定試験法も確立されている。したがって今後これら特殊塗料の活用によって実物の水車やモデル水車に発生するキャビテーションの強さや損傷位置が逐次明らかにされるものと期待される。

4.2 耐キャビテーション性の比較試験法

材料的なキャビテーション対策では前述のキャビテーション検出の問題と同時に、各種材料の耐キャビテーション性の評価が重視される。この種の目的には従来多くの試験法が試みられてきたが、ASME 年次大会 (1955-9) において、各種試験法が検討され、結果の再現性、実地の試験結果との相関性などの点で磁歪振動方式によるものが最もすぐれていると結論されてからこの方法が最も多く用いられるようになり、その標準化が考えられていることは注目される。

筆者らもこの方式の試験設備 (日立製作所日立研究所 2 基, 亀有工場 1 基) により、1953 年以降広範囲な材料について、水車およびポンプ製作上の実情を加味した研究⁽¹³⁾を実施してきたが、同時にこれらの結果に基づいて対策された実物の水車およびポンプについても実績調査を重ねている。その結果によればキャビテーションに対する材料的な対策の効果はきわめて顕著であるので、今後ますます強化されるものと思われる。キャビテーションによる損傷が衝撃的な繰返し応力による疲労的な破壊と考えると、その相対的な評価が条件の過酷さ (応力振幅) によって異なるのは当然であり、この方式による試験結果と実物の水車における結果とは必ずしも比例的な関係にあるというわけにはいかない。しかしながら試験条件は実物の水車より過酷であるので、少なくとも安全側に評価した結果と見なすことができる。すなわち、この試験法ですぐれた結果を示す材料は、実物の水車に使用した場合、これらの結果から予想される以上の効果が期待できるということで、筆者らの調査結果からもこのような傾向が認められる。個々の材料についての細部の記述は省略するが、材料の実用的な寿命を推定するためにもキャビテーションの強さについての的確な資料をうるということは重要な意味をもつわけである。第 3 図は、この試験法によって得られた潰食面のうち興味ある二、三の例を示している。

4.3 材料的なキャビテーション対策

水車の形式別に材料的なキャビテーション対策の現況と問題点を述べる。

フランス大形水車のランナは鋳鋼製が多いが、最近では鋼板溶接⁽¹⁸⁾ランナまたは鋳鋼、ステンレス鋳鋼と鋼板との複合ランナも実用されるようになった。これらのランナはしばらく使用してから潰食を生じた箇所にステンレス鋼による肉盛溶接を行う場合もあるが、多くは事前に損傷を生じやすい部分にステンレス鋼による肉盛溶接が行われている。この肉盛には通常 Cr および Ni の高いオーステナイト系のステンレス鋼溶接棒が多く用いられてきたが、最近さらに耐キャビテーション性のすぐれた 17-7 ステンレス鋼溶接棒も実用されるようになった。電源開発株式会社佐久間発電所 100,000 kW フランス水車のランナは、このステンレス鋼溶接棒による肉盛溶接の代表例である。

また負荷変動の著しい水車では全体的な耐キャビテーション性を改善するため 13Cr ステンレス鋳鋼でランナを作製する場合もある。また 13Cr ステンレス鋳鋼に 1% 前後の Ni を添加し耐キャビテーション性と肉厚部の機械的強度の改善を計ることも欧米では好んで行われている。最近では 13Cr ステンレス鋳鋼ランナにさらにオーステナイト系ステンレス鋼による肉盛を施し要部を保護したものもある。関西電力株式会社丸山発電所 70,000 kW および北陸電力株式会社神通第一発電所 48,000 kW フランス水車のランナは、その代表例で、形状の複雑な 13Cr 系ステンレス鋳鋼製大形フランス水車ランナに対する広範囲な肉盛溶接には溶接ならびに熱処理の高度な総合技術が必要とされるが、これらの運転後の実績はきわめて良好である。

また耐キャビテーション性のすぐれた 18-8 ステンレス鋼、14Cr-2Ni 鋼、アルミブロンズなどで作製されたフランス水車ランナもあるが、これらは小形の特殊な場合が多い。

可動翼プロペラ形のいわゆるカプラン水車ではランナにかなり以前から⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ 13Cr ステンレス鋳鋼が用いられてきたが、最近これに対しても 18-8 または 17-7 ステンレス鋼の肉盛による要部の保護が行われている。インドのヒラクッド第一発電所 38,800 kW、高知県電杉田発電所 12,000 kW カプラン水車のランナはその代表例である。また既納の 13Cr ステンレス鋳鋼製ランナに対する 17-7 ステンレス鋼の現地溶接による補強も、溶接技術の進歩により可能⁽²¹⁾となった。

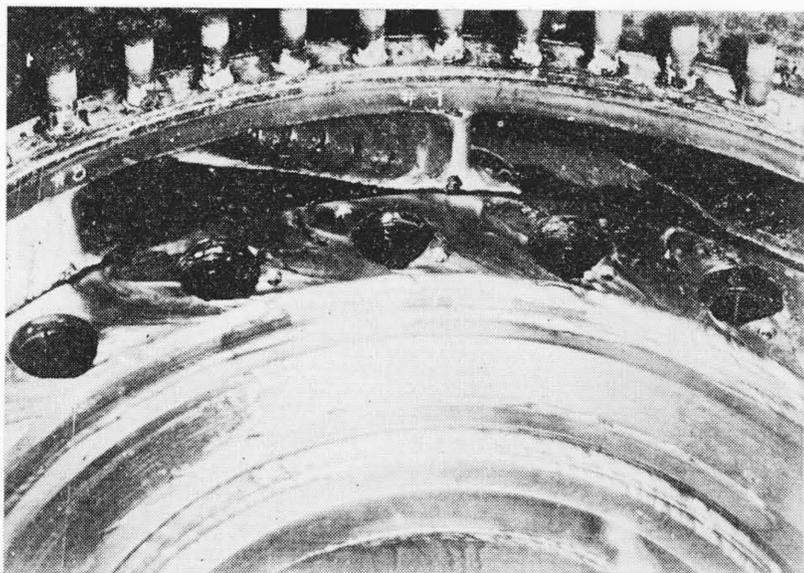
次にペルトン水車のランナには鋳鋼または低 Mn 鋳鋼が多く、構造的にも単独または二連バケットのボルト締めが多く採用されてきたが、最近 13Cr ステンレス鋳鋼製のバケットが増加する傾向にある。また高落差領域への適用範囲の拡大とともに 13Cr ステンレス鋳鋼による一体鋳造⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾のランナも実用されるようになった。この 13Cr ステンレス鋳鋼によるランナの一体鋳造には特に高度な鋳造技術が必要とされる。ビルマのブルーチャン第二発電所 29,840 kW ペルトン水車のランナはこの方式によるもので、第 4 図はこのランナを示す。

また記録的なものとして注目されている関西電力株式会社黒部川第四発電所 98,400 kW ペルトン水車のランナもこの方式によって自家で作製された。

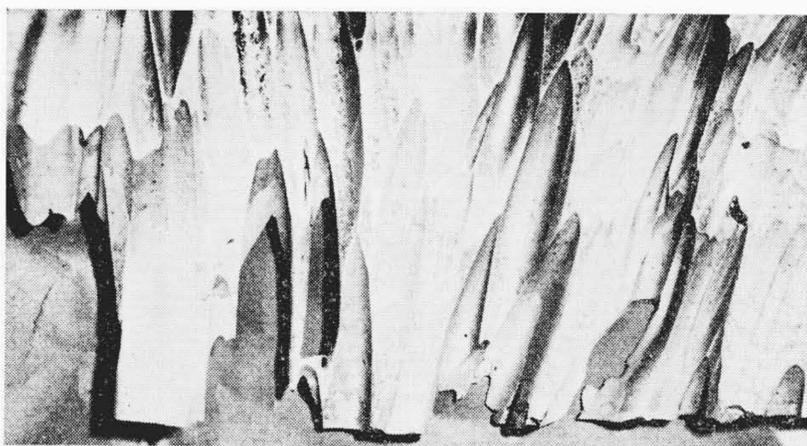
5. 摩 耗

5.1 流水中の土砂による摩耗

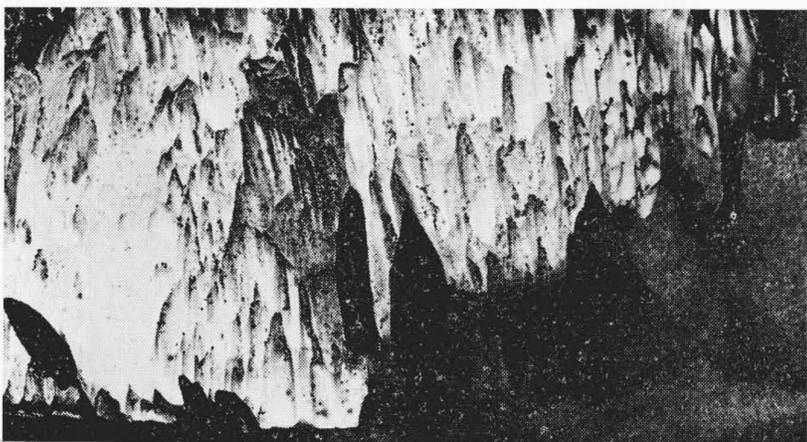
わが国の河川は急流で土砂を伴うものが多い上に従来水路式発電所が多かったため、土砂による水車の被害は程度の差こそあれ全国



(a) 水車の内部

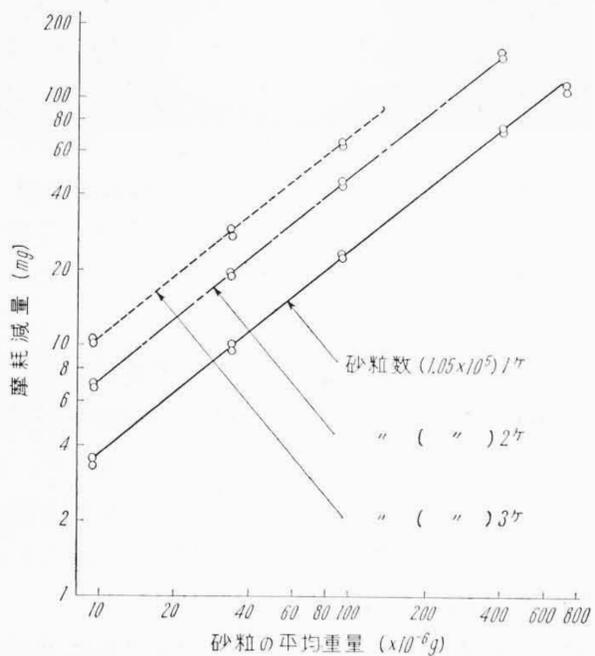


(b) 羽根の受圧面

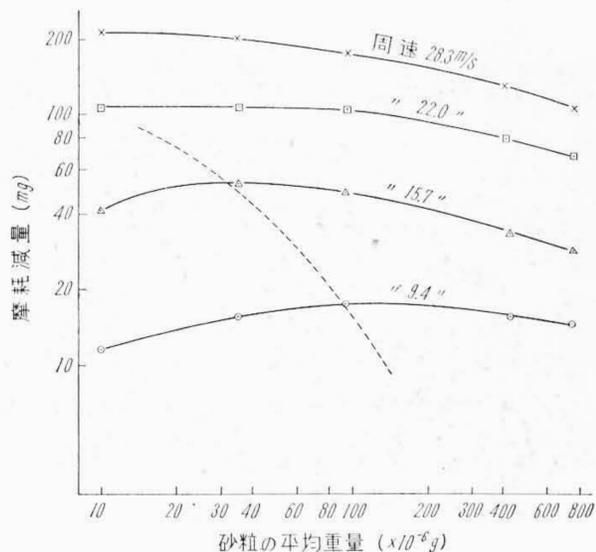


(c) 羽根の裏面

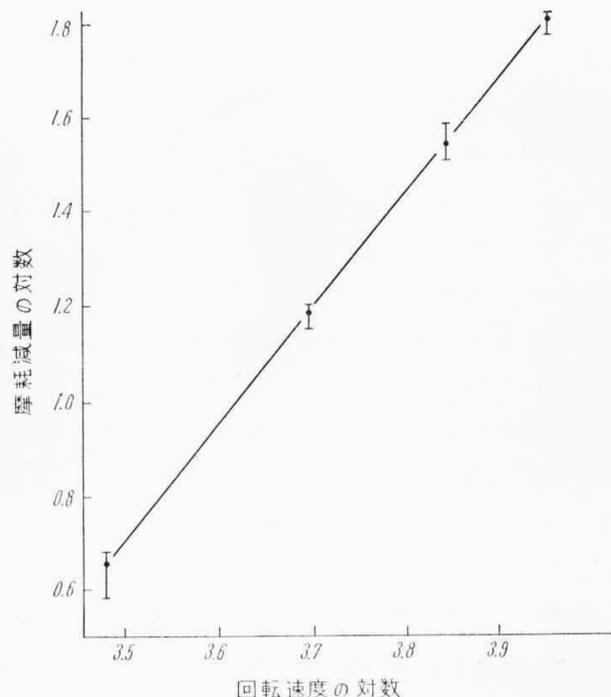
第5図 フランス水車の著しい摩耗例



第6図 摩耗に及ぼす砂の粒度および粒数の影響



(等量の砂による)
第7図 摩耗に及ぼす砂の粒度と水速の影響



第8図 摩耗減量と回転速度(水速)との対数間の関係

的なものといえる。この土砂による水車の被害は特定の箇所における異常な掘さくを特長としている。第5図は特に被害の著しいフランス水車についてその状況を示す。次にこれらの複雑な摩耗についての理解を助けるため筆者の行った現象的な研究結果⁽²⁵⁾の二、三について述べる。

試験法は高速回転円板(周速 15.7~28.3 m/s, レノールズ数 3.35~ 6.03×10^5) によるかくはん方式で、砂には鋳物用の珪砂を用いたものである。

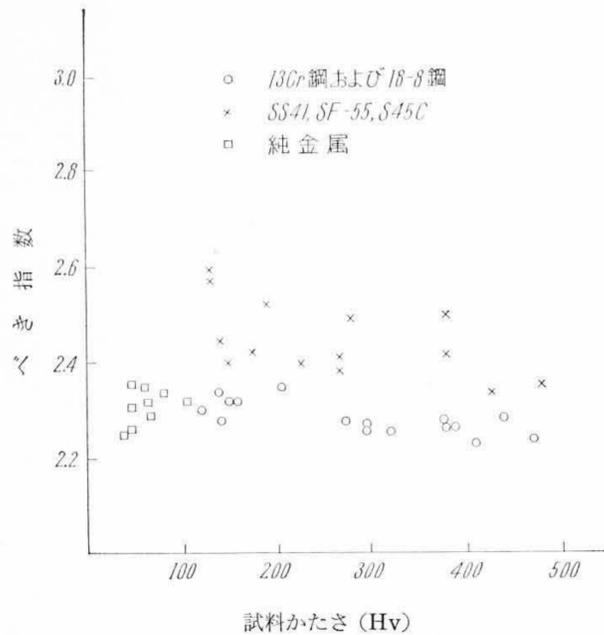
A. 砂粒の粒度ならびに粒数の影響

第6図はふるい分けした砂を含む水による摩耗試験結果で、摩耗に及ぼす粒度ならびに粒数の影響を示す。すなわち摩耗は砂粒数に正しく比例して増大し、粒数が等しいときは砂粒平均重量の約0.84乗に比例して増大する。

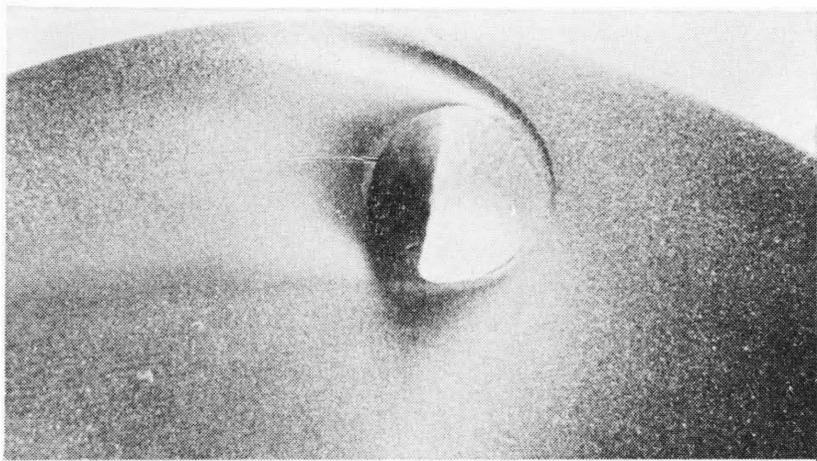
また第7図は粒度の異なる等量ずつの砂を含む水による実験結果で、粒度と水速の影響を示す。すなわち粒度の異なる等量の砂では水速によって最大の摩耗を与える特定の粒度があり、水速の増加とともにその特定の粒度は細粒側に移行する。したがって水速の大きい水車の場合には等重量の砂でも小粒で粒数の多いほうが大粒で粒数の少ない場合よりも実害が大きいことが知られる。

B. 水速の影響

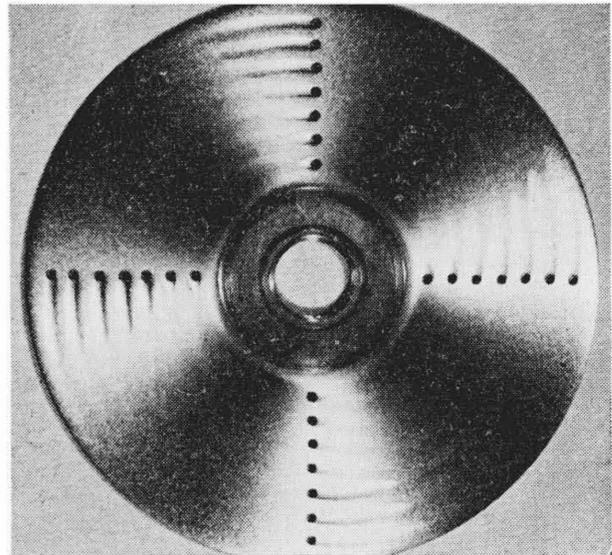
第8図は等質、等量、等粒度の砂による摩耗と水速との関係を示す。すなわち摩耗は水速のあるべきに比例して加速度的に増大する。



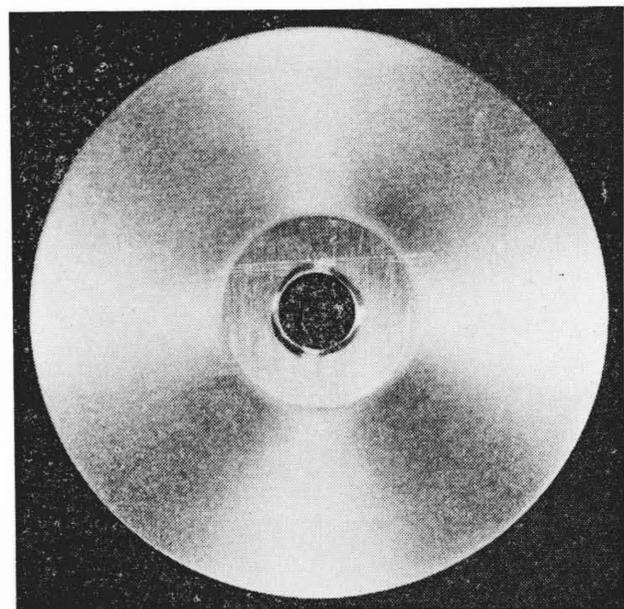
第 9 図 材料別に示したべき指数（摩擦—速度関係式の）とかたさの関係



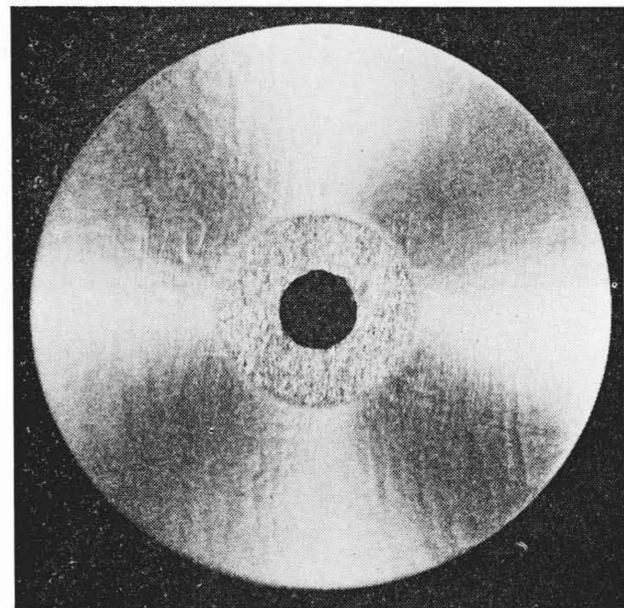
(周速 28.3 m/s, レノールズ数 6.03×10^5)
第 10 図 円板上の凸出物付近の摩耗



(周速 28.3 m/s, レノールズ数 6.03×10^5)
第 11 図 円板上の小孔付近の摩耗



(a) 表面あらさ 0.3μ



(b) 表面あらさ 10μ

第 12 図 表面の摩耗に及ぼすあらさの影響

また第 9 図は材料別にこのべき指数とかたさとの関係を示す。13Cr または 18-8 ステンレス鋼は一般炭素鋼よりもこの速度に対するべき指数が小さいので、高速側で有利となる。

C. 表面凹凸の影響

第 10~11 図は定性的に表面凹凸の影響を示す実験結果で、凸出物の前面や周辺部、小孔またはみぞの後縁部のように水圧や流速の増加する部分の摩耗が特に著しいことが知られる。また渦乱流の場合の円板付近の速度分布⁽²⁶⁾ から第 11 図の摩耗条痕を解析すると、第 11 図のような摩耗に直接関与しているのは試験面にきわめて近い(計算上は約 3μ) 部分の流れであることが知られる。このほとんど面に平行な流れの中で砂粒がいかにして試験面に近づくかは、摩耗の機構に関連して重要な問題であるが、乱流における乱れの機構についての Prandtl の混合長の概念⁽²⁷⁾ を支持することにより、面に垂直な速度変動をもちうるということが理解される。また第 12 図は表面あらさの影響についての実験結果を示す。すなわち 10μ 程度のあらさでは流れが乱れて摩耗を増大するが、 0.3μ 程度であれば一応なめらかと見なしうるということが定性的に示されている。

また噴射水中の土砂や自然流下水中の土砂による摩耗については伊藤氏⁽²⁸⁾や山下氏⁽²⁹⁾らの研究がある。

5.2 耐摩耗性の比較試験法

材料の耐摩耗性を比較するため従来多種多様な試験法が採用されてきたが、これを方式別に列挙してみると

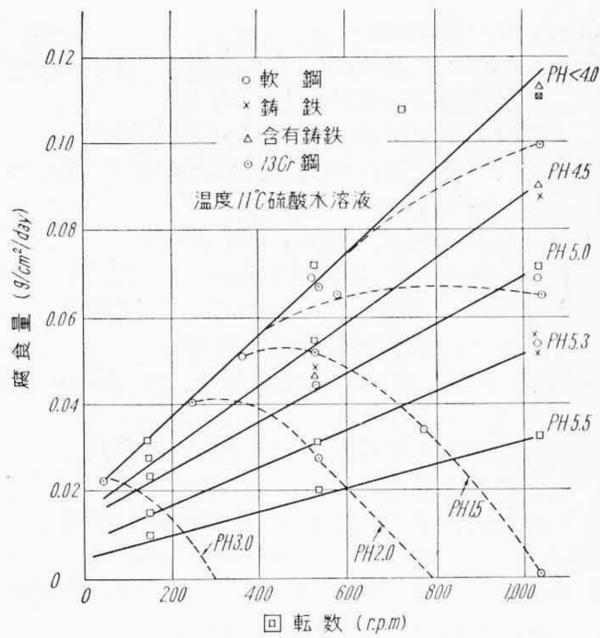
- A. 試片固定の自然流下方式
- B. " 強制循環 "
- C. " 液体ホーニング方式

D. 回転試片によるかくはん方式

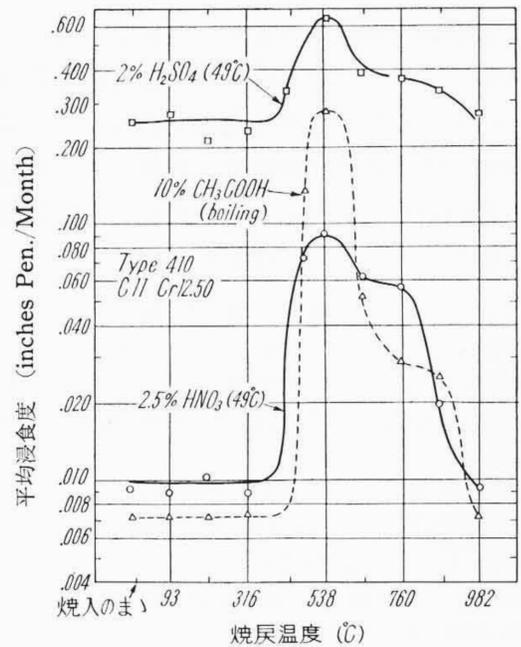
E. 転動試片によるボールミル方式

などである。試片形状についてもそれぞれ千差万別でそれぞれ一利一害がある。一般に流水中の土砂による金属材料の摩耗は、土砂の質、形状および量に依存することはもちろんであるが、前記のようにこれを輸送する流れの条件によって決定的な影響を受けるので、材料の耐摩耗性について普遍性のある評価を求めることは実験技術的にかなり困難な問題である。

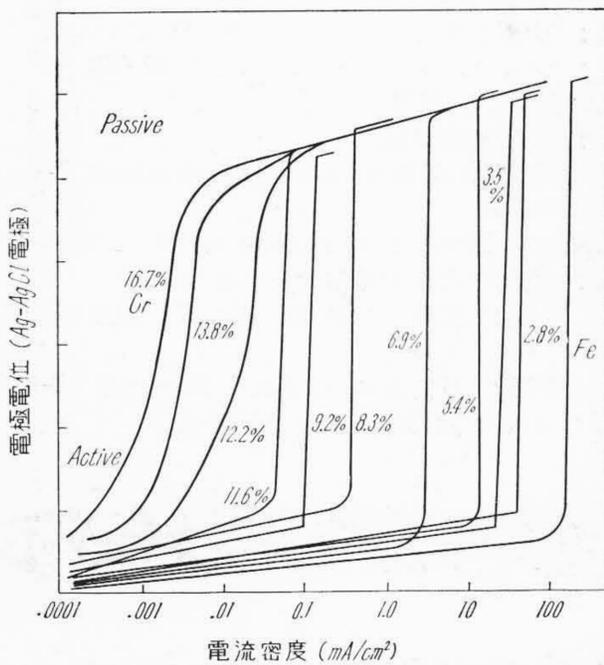
筆者は摩耗の進行に伴う試片形状の変化とこれによる流れの条件の変化を可及的に小さくするため、既述の高速回転円板によるかく



第 13 図 腐食に及ぼす流速および pH の影響 (H₂SO₄aq)



第 15 図 13Cr 鋼の耐酸性に及ぼす熱処理の影響



第 14 図 Fe-Cr 合金の陽極的分極特性 (3%Na₂SO₄aq)

はん方式により材料の比較試験を実施しているが、結果の再現性はきわめて良好で 5%以内である。傾向的には W. A. Stauffer の結果⁽³⁰⁾ と類似しているので、個々の材料についての細部の記述は省略する。

5.3 材料的な摩耗対策

ペルトン水車のノズルやニードル、フランシス水車のランナギャップを形成するライナ類などに最近 13Cr ステンレス鋼がかなり多く採用されるようになり、そのかたさも許しうる限度でできるだけ高くしようとする傾向があるが、これらが現在水車に一般的に採用されている材料的な摩耗対策である。

自硬性の大きい特殊材料を大形構造物に使用することも技術的に種々検討されているが、鑄造、加工、熱処理など各方面の技術的な困難さを倍加する上に、その効果についての経済的な評価がこれと引合うまでに至らないので、水車においてはまだ実用されていないが、小形のサンドポンプなどでは古くから実用されている。

しかしながら補修肉盛熔接における特殊材料の使用は盛んである。これらの熔接棒は多く市販⁽³¹⁾⁽³²⁾ されているが、日立では水車を対象とする特殊な棒はほとんど自給し、目的、熔接施工条件に応じて使い分けを行っている。

6. 腐 食

6.1 酸性水による腐食

水車の河川水による腐食は利用する河川水の水質によって著し

い差異があるが、東北、関東北部の酸性河川水を利用する発電所⁽³³⁾⁽³⁴⁾ では年々かなり著しい被害を受けている。これらの河川水の酸性度は水量そのほかによりかなり変化するが、概略 pH 値で 3~6^{(33)~(37)} 程度の硫酸を主とする無機酸性水で、酸の濃度としては 0.005~0.01%相当程度のかかなり稀薄なものである。したがって炭素鋼のような材料でも静水中の腐食はかなり緩慢であるが、流速によって加速される傾向があるため水車ではかなりな被害となる。第 13 図は鉄鋼および 13Cr ステンレス鋼について流速の影響⁽³⁸⁾ を示す。この 13Cr ステンレス鋼が流速の大きいところで腐食しにくくなるのは、陽極的な分極による不動態化によるとされているが、第 14 図はこの不動態化しやすさと Cr 量との関係を示す H. H. Uhling⁽³⁹⁾ の結果である。また 13Cr ステンレス鋼の耐酸性は熱処理条件によって変化する。第 15 図は F. Kenneth Bloom⁽⁴⁰⁾ の結果によりこれらの関係を示す。この熱処理による耐酸性の劣化は Ti, Mo⁽³⁸⁾, Cu⁽⁴¹⁾ などの添加により改善される。

またこれらの河川水では異種金属の接触、細隙などにおける濃淡電池的な腐食も著しい。

6.2 材料的な腐食対策

酸性河川水を利用する水車では用材の全面的な腐食のほか、異種金属との組合せや細隙などにおける濃淡電池的な腐食による局部的な腐食、腐食による疲れ限低下の問題についても特別な考慮を必要とする。

従来は砲金などの銅合金がランナそのほかにも多く用いられていたが、これは静水中の腐食データに基づくものであって、流水中ではかなり著しく腐食することが明らかにされてから、逐次 13Cr, Cu 入り 13Cr または 18-8 ステンレス鋼に切替えられており、その被害も著しく軽減されるようになった。現在ではランナだけでなくランナボス、ライナ類、案内羽根にまでこれらの材料が用いられている。これら大形ステンレス鋼、または板材の製造に当っては成分、組織などの均質化について特別な配慮^{(42)~(44)} が必要とされる。

異種金属との組合せ使用はできるだけ避けるべきであるが、経済的な理由からケーシングには通常鋼板あるいは鑄鋼が用いられている。また細隙腐食は絶縁性塗料の充てんによって軽減される。

7. 結 言

以上水車材料の問題点を中心にこれらについての最近の研究と技術的な進歩を概観した。この“水車は刻々食われている”という現実はいずれも水力機械の材料技術者にとって最も切実な問題であるが、最近この方面の研究が活発化し、問題の現象的な理解や材料

の選定についても適切な示唆が与えられるようになったことは喜ばしい。しかしながらこれらの研究成果が単なる研究的な興味に終ることなく、さらに広く実物の水車に適用されるためには、材質的な改善の効果に対する使用者側の経済的な評価という裏付けが必要であり、今後この方面の検討がますます活発化し、流体機械材料の技術面がいっそう進歩することを期待したい。

参考文献

- (1) 鈴木, 石橋, 辻: 金属, 23 323~ (1953-5)
- (2) 沼知ほか7名: 金属学会講演概要 108~(1955-4) 第3分科会
- (3) 早川, 臼井: 金属防食技術総覧 下巻 429~ (昭 27 日刊工業新聞社)
- (4) 重野: 防食技術資料 2 319~ (1953)
- (5) 下平: 金属学会誌 22 A-191~ (1958-10)
- (6) 防食技術 8 451~ (1959-10)
- (7) R. T. Knapp: Preprint for Annual Meeting (A. S. M. E.) No. 54-A-106 (Nov. 1954)
- (8) M. S. Plesset, A. T. Ellis: Preprint for Annual Meeting (ASME) No. 54-A-76 (Nov. 1954)
- (9) W.H. Wheeler: Trans ASME, Journal of Basic Eng., 184~ (March 1960)
- (10) Water power 377~ (Oc. 1958)
- (11) J. Z. Lichtman ほか 4: Trans ASME, 1325~ (Aug. 1958)
- (12) H. Schröter: Z. V. D. I. 77, 865~ (1933)
- (13) 藤間: 日立評論, 別冊 No. 11 123~ (1955)
- (14) 沼知: Trans ASME, Journal of Basic Eng., 153~ 195 (1959-2)
- (15) 小堀, 横山, 高田: 日立, 亀有工場研報 No. 323 (昭 30-2) (部外未発表)
- (16) S. L. Kerr, Kjell Rosenberg: Trans ASME, 80, 1308~ (1958-6)
- (17) L. E. Robinson, B. A. Holesmes, W. C. Leith: ASME

- No. 56-A-85 (1956-3)
- (18) F. M. Hessemer: Welding Eng., 32~ (Feb. 1960)
- (19) 田村: 日立評論 21, 653~ (昭 13-9)
- (20) 守江, 清水: 日立評論 26, 494~ (昭 18-9)
- (21) 中村, 雨沢: 日立製作所水戸工場調査報告 No. 59 (部外未発表)
- (22) 久保田: 神戸製鋼 7, 100~ (昭 32-2)
- (23) Hans E. Hubscher: Metal Progress, 77, 77~ (1960-1)
- (24) F. W. Kamber: Water power 232~ (1959)
- (25) 藤間: 金属学会昭32春季大会で発表
- (26) W. Müller(本間仁訳): 粘性流体の力学 225~ (昭 17 コロナ社)
- (27) 岡本: 応用流体力学 78~ (昭 28 誠文堂)
- (28) 伊藤: 熔接学会誌 24, 2~ (昭 30-12)
- (29) 山下: 鹿児島大学工学部紀要 2, 69~ (1953) 機械学会論文集 20, No. 97 620~ (1954-9)
- (30) W. A. Stauffer: Escher Wyss Tech Pub. (1956)
- (31) 秋本: 神戸製鋼 5, 184~ (昭 30-10)
- (32) Engineering Material Manual, (1952 Reinhold Pub. Co.)
- (33) 山下: 電力 39, 225~ (昭 30-12)
- (34) 東北電力技術委員会報告
- (35) 小林: 大原農業研究所報告 (1950-3)
- (36) 加藤: ケミカルタイムス 118~ (昭 32-10)
- (37) 東京電力: “吾妻川の水質について”
- (38) 下平: 特別講演予稿
- (39) H.H. Uhling G.E. Woodside: Electrochem. Soc., 57 280~ (1953-3)
- (40) F. Kenneth Bloom: Corrosion 9, 56~ (1953-2)
- (41) 藤間: 金属学会昭30春季大会で発表
- (42) 清野, 蜂須: 機械学会誌 61, No. 477 鑄造特集号 37~ (昭 33-10)
- (43) 田村, 清野: 日立評論 26, No. 5 285~ (昭 18-8)
- (44) 清野: 日立評論 36, 99~ (昭 29-6)



特許第244778号

小林 栄二・近野 大吉

電気ガバナを使用せる交流発電機の起動および同期化方式

この発明は、特許第243813号の電気ガバナ装置を使用して実際水車発電機を起動し運転状態とし系統に同期並列接続するに際して、円滑なる一貫操作を満足に行わせようとするものである。電気ガバナの速応励磁式可飽和リアクトル L_1, L_2 は、共振回路 10 の出力電圧 V_f によって付勢されるようになっており、別途揃速装置 25 と油圧サーボモータ 18 に連結する 2 個の電位差計 16, 17 の電位差に比例する電流を通ずるよう切替器 15 が設けられる。一方、上記の共振回路 10 も水車発電機 5 の指速発電機 6 の電圧周波数で付勢されるとともに、補助交流電源 4 から別途に付勢されるよう切替器 2, 3 が設けられている。水車発電機起動時には、電位差計 16 に対して 17 のタップ位置は低いので、その差によって L_1 または L_2 の

いずれかを通して、電磁弁 22 の一方線輪 23 あるいは 24 に通電し、18 を介して水車の導水弁を開く、17 はそれに追尾して 16 との差を縮める。このようにして水車発電機 5 が昇速すると、切替器 2, 3 が作動して共振回路 10 を 6 の出力端子に接続替える。同時に 2 相モータ 7 の線輪 W_1, W_2 をも付勢し、回路 10 の共振周波数を発電機 5 の周波数に追従するように調整する。揃速装置 25 の指導により発電機 5 が同期速度となり、系統への同期接続が行われると、それと同時に切替器 15 は、 S_1 から S_2 に替り、以後は速応励磁式可飽和リアクトル L_1, L_2 は共振回路 10 との連けいにより電気ガバナの本来の作用にはいることになる。このようにして起動から、同期化に亘って突入電流を防ぎ、発電機のうける衝撃を最小となす。(宮崎)

