

通信教育講座

技術士一次試験対策講座

電気電子部門

0章 専門科目（電気電子部門）	1
1章 送配変電	3
• 出題傾向	3
• 重要事項	4
1-1 例題と解説	6
1-2 練習問題	47
2章 電気応用	73
• 出題傾向	73
• 重要事項	74
2-1 例題と解説	75
2-2 練習問題	104
3章 電子応用	113
• 出題傾向	113
• 重要事項	114
3-1 例題と解説	115
3-2 練習問題	141
4章 情報通信	151
• 出題傾向	151
• 重要事項	152
4-1 例題と解説	156
4-2 練習問題	171
5章 電気設備	191
• 出題傾向	191
• 重要事項	192
5-1 例題と解説	193
5-2 練習問題	212

0章 専門科目(電気電子部門)

電気電子の専門科目は、次の5分野からなっています。

すなわち、発送配変電、電気応用、電子応用、情報通信、電気設備の5つです。一次試験の程度については、一次試験実施大綱によれば、「試験の程度は、基礎科目及び専門科目については、4年制大学の自然科学系学部の専門教育程度とする。」とされています。したがって、専門科目の場合、上記各分野のそれぞれの専門課程での教育内容に相当するものが出題されるとみるべきです。しかも、教育内容は、大学や専門分野によって異なりますので、受験者としては、大学の各専門分野の標準的な教科書に出ている程度のもは出題範囲とみて準備する必要があります。具体例としては、電気学会など各学会の発行する大学講座などと同等の教科書のレベルを考えておけばよいでしょう。

実際の出題のレベルもエネルギー部門の人から見た通信の問題や、通信関係者から見たエネルギーの問題など、専門外の分野についてはかなりの難問に感じられるものがあるのが実情です。

択一問題を中心に、最近の出題傾向を分野別に見ると下表のとおりです。表に示すとおり、平成15年から論文問題がなくなり、5者択一問題だけが30問出題され2時間で25問を答えることになりました。配点は1問2点で満点は50点です。

合格基準は、平成15年からは40%以上、すなわち20点以上で、かつ、基礎科目(15点満点で6点以上)と合わせて50%以上、すなわち、33点以上となっています。

平成15年以降では、電気応用と情報通信の出題数が多いことが目立ちます。

表 電気電子部門一次試験選択一問題の出題傾向

分野別	平成9年	平成10年	平成11年	平成12年	平成13年	平成14年	平成15年	平成16年
発送配変電	2	1	2	2	2	2	4	6
電気応用	2	3	2	2	2	2	7	7
電子応用	2	2	3	2	3	3	6	5
情報通信	2	2	2	2	2	2	10	9
電気設備	2	2	1	2	1	1	3	3
合計	10	10	10	10	10	10	30	30
小論文	3	3	3	3	3	3	0	0
解答数	13	13	13	13	13	13	25	25

電気応用は、ここに分類したものの、どちらかという、電磁気や電気回路、伝達関数などの基礎的な問題が含まれ、それが増加しつつあることを示しています。すなわち、平成15年は2題、平成16年は4題です。この他、各分野の出題でも基礎的な問題が増加しているように見受けられますので、基本に帰っての勉強が必要です。特に、三角関数の積と和・差との相互変換や、電圧電流と電力との関係式、基本的なトランジスタ回路の特性、パワーエレクトロニクスでは、基本的なチョップ回路やPWM回路の特性、各種半導体素子の特徴などはしっかりと把握しておいてください。

情報通信は、一部、二次試験に相当するほどの高度な内容のものを含み、出題数が全体の1/3を占めるという状況です(平成15～16年)。しかし、中には基礎的な問題が2～3題ありますので、情報通信を専門としない受験者もこれらの極めて基礎的な問題は着実にできるように準備しておくことが重要です。さらに進んで、インターネット関連の事項(基礎科目の情報・論理編でもある程度解説)、光ファイバーの特性などもよく出題されますのでひととおり勉強しておく必要があります。

計算に関わる問題も平成15年4問、16年13問と、年により変化がありますが、基礎的なものと関連するものが多いので今後も多く出題されると考えられます。計算問題は、ほとんどが、計算式が示されているか、容易に推定が付くものが多いので、難しそうな見かけに驚かずに、よく問題を眺めて、どうすれば答えが出せるのかを落ち着いて考えてみるのが重要です。

計算問題に関連する基礎的なものとして、三角関数や指数・対数とオイラーの公式、ド・モアブルの公式、線形微分方程式の解法、伝達関数の意味合いと求め方、制御系の安定性の判定、ベクトル解析、行列などを洗いなおしておく必要があります。マクスウェルの電磁方程式についてもその意味合いをよく理解しておく役立ちときがあるでしょう。また、力や運動など力学の基礎も復習しておく必要があります(上記の一部は基礎科目の解析編でも取り上げています)。

一次試験に合格するには、以下各章の内容を十分に把握・理解し、要点が資料なしですらすら書き出せる程度まで練習し、さらに、計算問題に習熟するとともに、疑問点は章末に紹介されている文献等で調べるといった積極的な学習態度が重要です。各分野の特徴等については、以下各章の冒頭に出題傾向分析や受験対策について述べていますので、それをご覧ください。

1章 発送配変電

■対象範囲

技術士一次試験科目，専門科目の発送配変電に関し，発送配変電に係わるシステム計画，設備計画，施工計画，施工設備及び運営関連の設備技術に関する事項，発電設備，送電設備，配電設備，変電設備その他の発送配変電に関する事項が対象範囲となっています。

■出題傾向

平成13年度から平成16年度の間で出題された問題は次のとおりです。

		平成13年度	平成14年度	平成15年度	平成16年度
発電	火力：汽力など	◎		○	○
	水力：揚水，種類			○	●
	原子力：BWR，PWR	○	◎	○	
	新型発電方式：FC，太陽光，風力など			●	○
	分散型電源の運用		◎		○ ○
送電	系統安定度など	◎	◎ ● ●	○	
	送電線，コロナ多導体			○	
配電	変圧器	◎			
	配電線			●	● ●
変電	遮断器		◎	○	
	コンデンサ・リアクトル				
	変圧器，接地			○	●

[注] ○：択一式，◎：記述式，●：計算（択一式を含む）

平成15年から記述問題はなくなりましたが、択一式の問題の中には、内容をよく知らないと解けないものもあります。また、平成16年度は、発送配変電に関する問題7問中5問が計算問題(択一式)でした。今後、留意する必要があります。

表中にはありませんが、平成11年から平成16年度までの出題傾向を見ても、汽力、水力、原子力、新型発電方式、変圧器(配電、変電)、遮断器(配電、変電)、送電のうち圧倒的に多導体と送電電力(含む、系統安定度関連)に偏って出題されています。この6年間を見る限り、地中送電に関する出題がありません。また、出題されている問題の内容もいわゆる電験三種レベル、またはそれよりややレベルが高い程度のもので、特に凝った問題はありません。したがって、基本的な項目について勉強することが肝要で、特に過去に出題された問題を中心に勉強すべきでしょう。同じ課題が、視点を変え繰り返し出題されています。

たとえば、火力では、平成12年度にディーゼル発電の計算問題が出題されていますが、平成15年度はディーゼル発電の特徴について出題されています。水力では、平成11年度に揚水発電に関連する問題が出題され、平成12年度にも揚水発電の目的、特徴について出題されています。原子力は、平成13～15年度にPWR、BWRに関連する問題が出題されています。変電・配電では、平成11年度に高圧用遮断器、平成14年度に遮断器・断路器が、変圧器では、平成12年度に変圧器の結線方式、平成13年度に変圧器の種類と結線方式、平成15年度に変圧器の中性点接地方式について出題されています。

■重要事項

重要なポイントは、発電は汽力、水力、原子力を中心に、ディーゼル発電やコンバインドサイクル発電、燃料電池、風力、太陽電池などの新型発電方式、水力は揚水発電方式、原子力はPWR、BWRで、これらの特徴などの知識を仕入れておくとい良いでしょう。送電は、多導体に関連する知識としてコロナ損、電波障害、誘導障害、多導体送電の特徴(系統安定度の観点から)等を学習しておいてください。配電・変電は、遮断器・断路器に関する知識をまとめておいてください。変圧器の中性点接地方式は重要なポイントです。電力用コンデンサの役割や直列リアクトルの役割、避雷器の中では、酸化亜鉛形の特徴を学習しておいてください。

以下に重要と思われるポイントを列举します。

■重要事項

1. 水力発電

- ・水力発電方式：水路式，ダム式，ダム水路式，揚水式
- ・有効落差と出力の計算
- ・水力発電所の年間の電力発電量
- ・揚水発電の計算： $P=9.8QH\eta$
- ・水撃作用と対策：サージタンク，ヘッドタンク
- ・水車の種類：衝動水車と反動水車
- ・吸出管の役割
- ・调速機と速度変動率

2. 火力発電

- ・汽力発電機と水車発電機の違い
- ・汽力発電所と原子力発電のタービン・発電機の違い
- ・発電機の冷却方式
- ・汽力発電所の水・蒸気などの流れ
- ・汽力発電所の設備
- ・汽力発電所の環境対策
- ・ディーゼル発電
- ・ガスタービン発電
- ・コンバインドサイクル発電

3. 新型発電方式

- ・地熱発電，燃料電池発電，太陽光発電，風力発電

4. 原子力発電

- ・原子力発電，構成要素と燃料
- ・核燃料サイクル

5. 変電

- ・遮断器・変圧器，ガス絶縁開閉器
- ・調相設備と電圧調整
- ・避雷器

6. 送電

- ・直流送電
- ・送電電力
- ・ねん架
- ・中性点接地方式
- ・送電線の障害
- ・多導体
- ・送電線の振動
- ・架空地線，埋設地線
- ・電力ケーブル，CVT，CVケーブル
- ・ケーブル損失，充電電流
- ・短絡電流
- ・フェランチ効果
- ・塩害—碍子の絶縁，雪害—スリートジャンプ，ギャロッピング
- ・地中送電線の布設方式：直埋設式，管路式，暗きょ式
- ・コロナ損
- ・逆フラッシュオーバ

7. 配電

- ・配電線の構成：配電系統，スポットネットワーク方式，レギュラーネットワーク方式
- ・V結線
- ・配電線の保護方式

1-1 例題と解説

【例題 1-1】

(平成 11 年)

タービン発電機と水車発電機の一般的な相違に関する記述で誤っているものは、次のうちのどれか。

- ① タービン発電機の回転子の回転速度は、水車発電機のそれに比べて高い。
- ② タービン発電機の回転子は円筒形であるが、水車発電機の回転子は突極形である。
- ③ タービン発電機では水素冷却方式が採用されるが、水車発電機では採用されない。
- ④ タービン発電機では臨界速度が定格速度より高いが、水車発電機では臨界速度が定格速度より低い。
- ⑤ タービン発電機は横軸形であるが、水車発電機は横軸形又は立軸形のいずれかが採用される。

〔解答と解説〕

- ① 汽力発電所または原子力発電所のタービン発電機は、2極または4極形の非突極機（円筒形）です。回転速度（数） N は、下式で与えられます。

$$N = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots(1-1)$$

ここで、 N ：発電機の回転速度（同期速度）、 f ：周波数、50 または 60Hz、
 p ：発電機の極数

たとえば、 $f=50\text{Hz}$ 、 $p=2$ 極としますと、回転速度 $N=3000\text{rpm}$ として与えられます。水車発電機の極数はタービン発電機のものより多く、立軸形では 12 極から 48 極、多い場合で 64 極などというものもあります。横軸形では 8 極から 20 極程度まであります。たとえば、64 極の場合、 $f=50\text{Hz}$ としますと、回転速度 $N=93.8\text{rpm}$ となり、タービン発電機の回転速度は、水車発電機に比べ格段に高速となります。

- ② 水力発電所は一般に山岳地に建設されるので、輸送手段としては、トレーラーや鉄道等ですから、発電機は分解、組立て可能なものでなければなりません。一方、タービン発電機は、原子力発電所、汽力発電所が海岸地域に建設されることから、一般に船によって運搬され、分割の必要がなく大型のものであ

ても一体構造で造ることができ、高速回転に耐えられるだけの強度を確保しやすいといえるわけです。

発電機の出力 P は、下式で表されます。

$$P \propto D^2 \times L \times N \dots\dots\dots(1-2)$$

ここで、 D ：発電機の直径、 L ：鉄心の長さ、 N ：回転速度

発電機の大容量化に伴って、高速、長スパン、大直径の発電機が求められてきましたが、機械的強度や搬送上の制約から、水力では高速にできないので、直径を大きくし大容量化に適用させています。速度を遅くする、すなわち極数をふやすことにより回転速度を低減させています。単機容量を確保するために、直径を大きくした分、速度を低減し外周にかかる遠心力を小さくしたものです。

- ③ 現在では、大容量タービン発電機の回転子の冷却には、水素冷却が採用されています。水素は、空気に比べ密度が $1/14$ と小さく風損が少ない、熱伝導率が 1.5 倍あり冷却効果大きい、不活性なガスでコイルに対し酸化・腐食をさせない等の利点があります。また、固定子巻線に対し、直接、水を通して冷却する直接冷却方式（または内部冷却方式）が採用されています。
- ④ 発電機軸には軸が本来持っている固有の振動数（固有振動数）があり、回転速度と一致すると共振して激しく振動し、場合によっては回転している周囲に接触し相互に損傷を与えたり、破損したりします。タービン発電機が細長く、水車発電機がずんぐりしているので、固有振動数は、相対的にタービン発電機のほうが低く、水車発電機のほうは高いものとなっています。大形のタービン発電機では定格速度より低いところに危険速度域があり、危険速度域をすばやく通過するように運転しています。したがって、④が誤った記述です。
- ⑤ 大容量の水車発電機はほとんどが立軸形となっていますが、その理由は、大容量となり、発電機直径が大形化し、重量が増大することによって、ひずみが大きくなる傾向にあるからです。横軸形より固定子枠の制約が少ない立軸形が有利となります。このほか、水車の吸出し水頭を有効に利用できるという理由から立軸形が採用されています。一方、タービン発電機は、速度と長さで大容量を得ようとするので、横軸形が採用されています。

解答：④

【例題 1-2】

ドラム式再生再熱形汽力発電所の水、蒸気の流れに関する下記の記述で、正しいものはどれか。

- ① 復水器から出た水は復水ポンプで加圧され、ボイラを通過して給水加熱器で 538℃の過熱蒸気となり、低圧タービンで仕事をする。さらに、この蒸気は、空気予熱器に戻され 566℃の過熱蒸気となり、高圧タービンで仕事をした後、復水器に戻される。
- ② 復水器から出た水は復水ポンプで加圧され、ボイラを通過して節炭器で 538℃の過熱蒸気となり、高圧タービンで仕事をする。さらに、この蒸気は、ボイラドラムに戻され 566℃の過熱蒸気となり、低圧タービンで仕事をした後、復水器に戻される。
- ③ 復水器から出た水は給水ポンプで加圧され、ボイラを通過してボイラドラムで 538℃の過熱蒸気となり、高圧タービンで仕事をする。さらに、この蒸気は、節炭器に戻され 566℃の過熱蒸気となり、低圧タービンで仕事をした後、復水器に戻される。
- ④ 復水器から出た水は給水ポンプで加圧され、ボイラを通過して過熱器で 538℃の過熱蒸気となり、高圧タービンで仕事をする。さらに、この蒸気は、再熱器に戻され 566℃の過熱蒸気となり、中・低圧タービンで仕事をした後、復水器に戻される。
- ⑤ 復水器から出た水は給水ポンプで加圧され、ボイラを通過して再熱器で 538℃の過熱蒸気となり、高圧タービンで仕事をする。さらに、この蒸気は、過熱器に戻され 566℃の過熱蒸気となり、中・低圧タービンで仕事をした後、復水器に戻される。

〔解答と解説〕

- ①, ②, ③, ⑤ 誤った記述です。
- ④ 正しい記述です。

空気予熱器は、ボイラ排気の余熱を、押し込み送風機 (FDF) により押し込まれた外気温の空気に煙道ボイラ側上部で熱交換し、暖かい空気としてボイラに入れ、熱効率の低下を防ぐものです。節炭器 (エコマイザー) は、ボイラ排気の余熱で、給水ポンプ (BFP) により押し込まれた給水を暖める熱交換器で、熱効率の向上

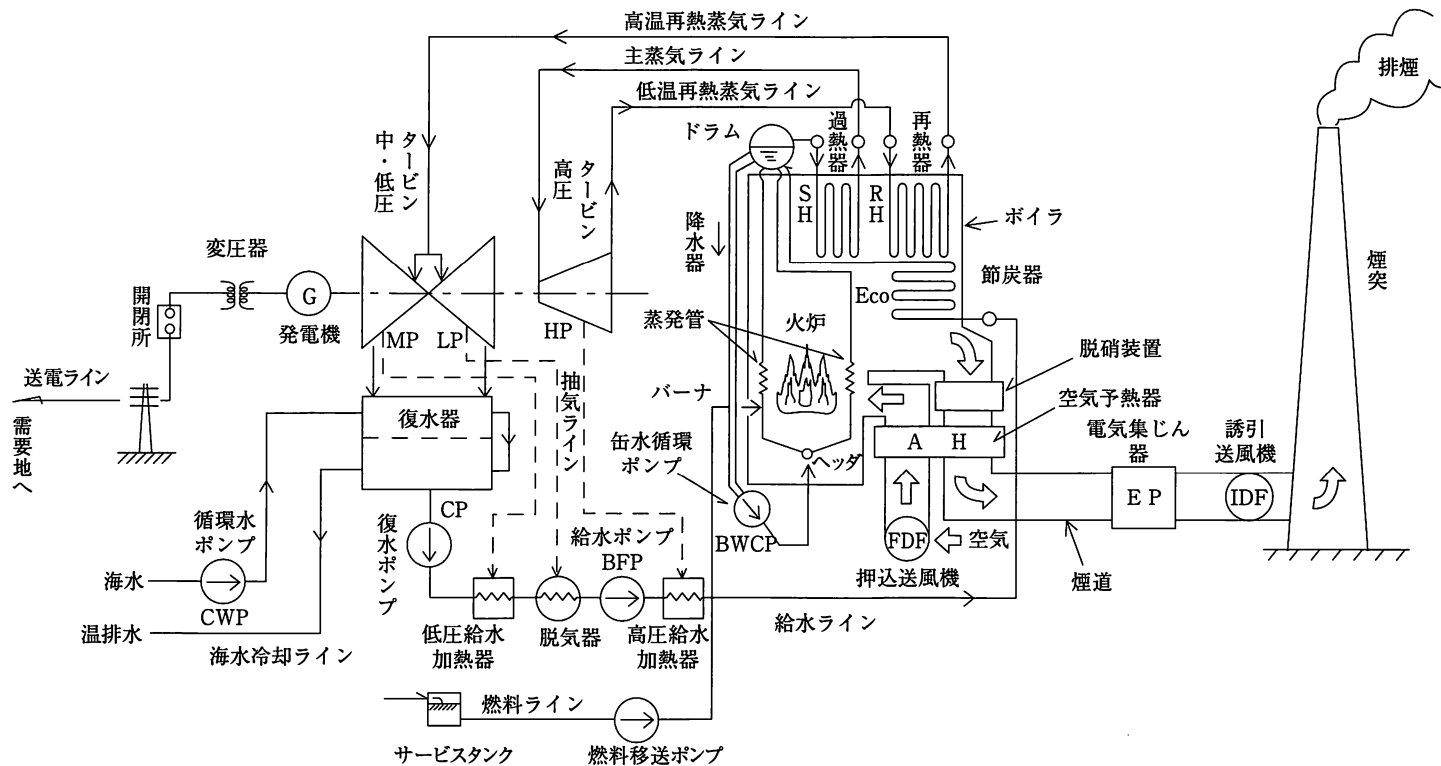


図 1-1 汽力発電所, 再生再熱形, ドラム形ボイラの給水, 蒸気・空気・燃料の流れ

に寄与しています。復水ポンプは、復水器から出る熱水を集めて、給水加熱器に送る役目をしています。給水加熱器は、ボイラへの流水に、タービンから抽気した蒸気により熱を与えて流水温度を上げる熱交換器です。再熱器は、高圧タービンで仕事をした過熱蒸気を再度過熱して高温の過熱蒸気とし、中圧・低圧タービンで仕事をさせるためのものです。

図1-1に、再熱形汽力発電所の水、蒸気の流れ図を示します。再生サイクルとは、復水器の冷却水に放出される水(蒸気)の蒸発潜熱損失を軽減するために、タービン内の膨張過程の途中で蒸気を抽出(抽気)し、ボイラ給水を加熱し、熱効率を改善させるものです。

初蒸気圧を高くするほど、タービン低圧部分の蒸気湿度が増加し、蒸気の摩擦損失が増大し、内部効率を低下させます。また、タービン部材の材質強度は、 538°C を越えると著しく低下するので、大きな熱落差を得ることにはおのずと限界があります。そこで、高圧タービンから出たまだ湿り蒸気となっていない蒸気を再び再熱器により過熱蒸気とし、中・低圧タービンで仕事をさせ熱効率の向上を図るシステムを再熱サイクルといいます。再生再熱サイクルとはこの2つを組み合わせた熱サイクルのことです。ここでは、基本的なドラム式再生再熱サイクルの系統図と、給水、蒸気、空気、燃料の流れを理解しましょう。

【例題1-3】

(平成15年類似)

各種発電方式について述べた以下の記述で、誤っているものはどれか。

- ① 原子力発電として、日本では加圧水形及び沸騰水形の2種類の原子炉が実用化されている。
- ② 原子力発電は、原子炉から核反応によるエネルギーを熱エネルギーの形で外部に取り出し、蒸気タービンを運転して発電を行うもので、一般の汽力発電に比べ熱効率が高い。
- ③ 水力発電用の衝動水車としてはペルトン水車が、反動水車としてはフランシス水車、斜流水車、プロペラ水車などが用いられている。
- ④ 水力発電の调速機動作によって水圧管に水撃作用を生じる。水圧上昇防止のためサージタンクが用いられる。
- ⑤ ディーゼル発電機は設備が比較的簡単で、始動及び全負荷運転に至るまでの

時間が短いという特長がある。

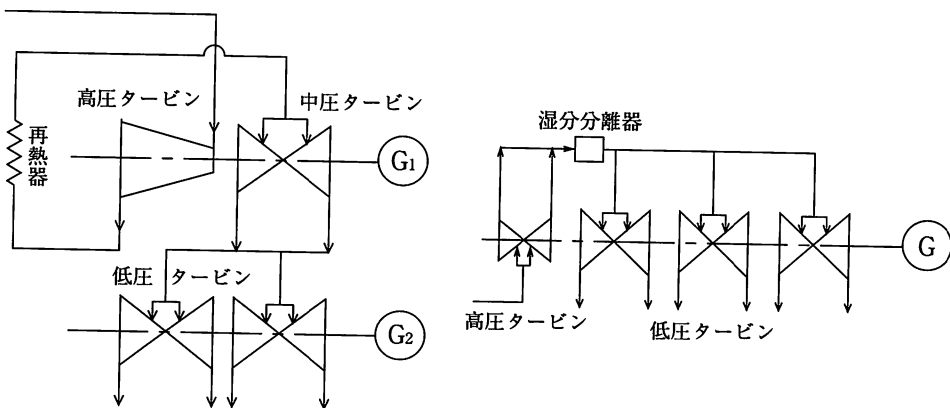
〔解答と解説〕

- ① 正しい記述です。
- ② 熱効率が低いということが誤った記述です。原子力発電は、汽力発電に比べ、温度、圧力ともに低く、したがって熱効率も低く、蒸気は飽和蒸気（汽力発電は過熱蒸気）なので湿分分離器が必要となります。温度、圧力が低いことから、同じ1000MW級の発電設備であっても、原子力発電設備のほうが巨大な容積となります。

汽力発電所の主蒸気温度/再熱蒸気温度および主蒸気圧力は、538°C/566°C、 $2.41 \times 10^7 \text{Pa}$ (246kg/cm²) に対し、原子力は、主蒸気温度、主蒸気圧力は、282°C、 $6.55 \times 10^6 \text{Pa}$ (66.8kg/cm²) であり、単純計算すると、原子力発電の蒸気容量は、汽力のそれに比べ、約2倍の容積が必要となります。

このことは、原子力発電のタービンは汽力に比べ、各部の寸法を大きくしなければならないことを示しています。これにより、原子力タービンの最終段翼は、大容量の蒸気を受け止め排気する必要があり、汽力タービンの回転数が3000または3600rpm（2極機）に対して、原子力は1500または1800rpm（4極機）となっています。これは、遠心力の制約のため、低压最終段に排気面積の大きな長翼を採用できないからです。

一例として、汽力1000MWと原子力1100MW級の発電設備を比較してみます。汽力タービンが、4流排気、1段再熱の高圧・中圧タービン（2極機、



汽力：クロスコンパウンド、4流排気一段再熱形

原子力：タンデムコンパウンド、6流排気、非再熱形

図1-2 汽力（1000MW）並びに原子力（1100MW）タービン発電機の構成例

1500 または 1800rpm) を一つの軸とし、高圧タービンの排気を再熱して中圧タービンに戻し、それを別の軸に一系列に並べた低圧タービン A, B 2 台に供給するクロスコンパウンド形なのに対し、原子力タービンは、6 流排気、非再熱の高圧タービン 1 台からの排気を低圧タービン A, B, C 3 台に供給する一軸上に配列したタンデムコンパウンド形となっています。

タービン熱効率、蒸気条件の差から、汽力が 46.7% に対し原子力は 33.4% 程度となっています。図 1-2 に、1000MW 級汽力タービンと 1100MW 級原子力タービン (BWR) の構成例を示します。

③ 正しい記述です。水力発電の水車の種類について考えてみましょう。

もともと、流水は、位置水頭水 (位置エネルギー、高いところのほうが低いところより高いエネルギーを持っている、物が落下する場合、位置エネルギーが小さくなって、速度エネルギーが増大する)、速度水頭 (速度エネルギーは、速度が大きいほうが大きなエネルギーを持っている)、圧力水頭 (圧力エネルギーは、水の重量によるエネルギーのことである) の 3 つのエネルギーを持っています。水車には衝動水車と反動水車とがあり、衝動水車の代表的なものに、ペルトン水車があります。

ペルトン水車は、流水の持っている圧力水頭を、ノズルにより高速の流水とし、すなわち速度水頭に変換し、バケットと呼ばれる受け皿に衝突させて、回転という機械的な仕事に変える水車です。

一方、反動水車とは、水が持つ圧力水頭を、ランナを利用して回転という機械的な仕事に変える水車です。反動水車には、例題文のようにフランシス水車、プロペラ水車、斜流水車の他、カプラン水車などがあります。

フランシス水車は、流水を案内羽根 (ガイドベーン) によりランナの外周から流入させ、ランナ内で軸方向に流れを変えて流出させる水車です。案内羽根から出た流水は圧力水頭と速度水頭に変化し、水で充満されたランナの中を通り、ランナの下にある吸出管を通して放水路に流されます。ランナが水で満たされていることにより、ランナから吸出管下部までの落差を有効に利用できます。

斜流水車は、フランシス水車の構造に似ていますが、フランシス水車がランナと流水の角度が直角なのに対し、斜流水車は、ランナに流水が斜めに入るよ

うにした構造のものです。

このうち、ランナベーンを可動翼としたものをデリア水車とといいます。

プロペラ水車は、フランシス水車の構造に似ていますが、流水がランナの軸方向に流れるように、ケーシングからの流水の流れをランナに導いた構造をしたものです。このうち、ランナベーンが可動となっているものをカプラン水車とといいます。

また、例題文にはありませんが、低落差用の衝動水車の一種にクロスフロー水車があります。ランナは円筒形をしており、流水がランナに垂直に入った後、ランナ外周に再び出ることによって流水が2回ランナに働く構造となっています。数千キロワット以下で使用され、4m以下の落差でも発電ができるといわれています。

- ④ 正しい記述です。負荷を急変させる、すなわち水圧管内の流水を急に止めたり、急に動かしたりすると管内の圧力が急変し、上昇したり減圧したりします。これを水撃作用とといいます。水撃作用は、ア) 流水速度が大きいほど、イ) 水圧管が長いほど、ウ) ガイドベーンやニードル弁の動作速度が速いほど、大きく作用します。この水撃作用が大きいと、水圧管が破壊される可能性があります。これを防ぐ目的で、サージタンクが用いられています。
- ⑤ 正しい記述です。ディーゼル発電は、燃料をディーゼル機関内部で燃焼させ、高圧燃焼ガスの膨張力により機関を駆動、発電させる内燃力発電方式の一つです。ディーゼル発電の特徴として、以下の項目があげられます。

- ア) 効率が高い。30～38%程度。
- イ) 短時間始動、数分で立ち上がる。
- ウ) 冷却水も比較的少量で済む。
- エ) 出力に比し、小形軽量。
- オ) 建設期間が短く建設コストも低い。
- カ) 騒音・振動・NO_x 対策が必要。
- キ) 排気管の爆発事故に留意する必要がある。
- ク) 非常用、島嶼^{しよ}発電用に用いられている。

参考文献：新版『火力発電』「東京電機大学出版局」

【例題 1-4】

(平成 14 年)

原子力発電の原子炉として用いられている PWR と BWR に関して、その言葉の意味、燃料、減速材及び冷却材の種類などに言及して説明せよ。

〔解答と解説〕

PWR：加圧水形軽水炉 (Pressurized Water Reactor), BWR：沸騰水形軽水炉 (Boiling Water Reactor) といい、日本の商用原子力発電は、この 2 種類です (図 1-3, 4)。燃料は、両者ともウラン 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) で、衝突確率を高めるため軽水により減速した低速の熱中性子を $^{235}_{92}\text{U}$ に衝突させると、 $^{235}_{92}\text{U}$ の原子核 $^{94}_{38}\text{Sr}$, $^{140}_{54}\text{Xe}$ と 2 個の高速中性子に分裂し、そこに質量欠損 (分裂後の合計質量が分裂前よりも減少すること) が生じ、この質量欠損に相当するエネルギー

$$E = \Delta mc^2 \quad (\Delta m : \text{質量欠損}, c : \text{光速})$$

が発生します。またこのとき、発生した 2 個の高速中性子は水 (軽水) の中で減速され熱中性子となり、再び $^{235}_{92}\text{U}$ に衝突します。これを繰り返して、熱エネルギーを水に放出し、蒸気としてタービンを回し、この回転エネルギーを発電機により電気エネルギーに変換しています。

PWR は、原子炉に直接つながる一次系と、蒸気発生器を介した二次系に分けられ、蒸気発生器で造られた蒸気を二次系の蒸気ラインでタービン発電機に導き発電させる方式で、一次系では高圧・高温にするために加圧器を用いて、一次系の原子炉の水を加圧して沸騰しないようにしています。

PWR 形原子炉の制御は、制御棒の圧力容器上部からの出し入れとホウ素の濃度調整により行われます。制御棒を挿入すると中性子が制御棒に吸収され核反応が低下し、引き出すと核反応が活性となります。PWR の場合、制御棒は自動制御状態にあります。ゆっくりした出力制御はホウ素の濃度調節により行い、速い出力制御は制御棒の出し入れにより行います。

一方、BWR は、原子炉圧力容器内で発生した蒸気を直接蒸気タービンに導き回転させています。蒸気タービンには放射能を帯びた蒸気が循環することになります。制御棒は圧力容器の下部より水圧式により挿入されます。原子力の出力制御は PWR と同様に制御棒の出し入れ (制御棒を挿入すると中性子が制御棒に吸収され核反応が低下し、引き出すと核反応が活性となる。中央操作室からの手動操作で行う) と再循環ポンプで炉心流量を調節し、圧力容器内の気泡 (ボイド) を利用し制

御しています。

核分裂反応は、速度の遅い熱中性子によって引き起こされ、高速中性子ではほとんど起こりません。また、高速中性子は水（軽水）中で減速され熱中性子になります。高速中性子は水に触れている時間が長いほど熱中性子になりやすいというわけです。水が沸騰すると水中には気泡（ボイド）が発生するので、高速中性子は、気泡の中を通過する分、減速されにくくなります。すなわち、熱中性子になる割合が低下する、したがって核分裂反応は低下するということになります。

再循環ポンプによって炉心流量を増加させると、気泡（ボイド）のない状態となって、核分裂反応が活性化し、逆に、炉心流量を減少させると気泡が発生し高速中性子の割合が増えて、核分裂反応が低下します。気泡がない軽水が燃料の周りになると、減速されやすいので核反応は進行し、熱が発生して水が沸騰すると気泡が増えて反応が低下し、熱エネルギーが発生しにくくなります。これをボイド効果といい、BWRは、本質的に抑制効果が働く仕組みになっています。

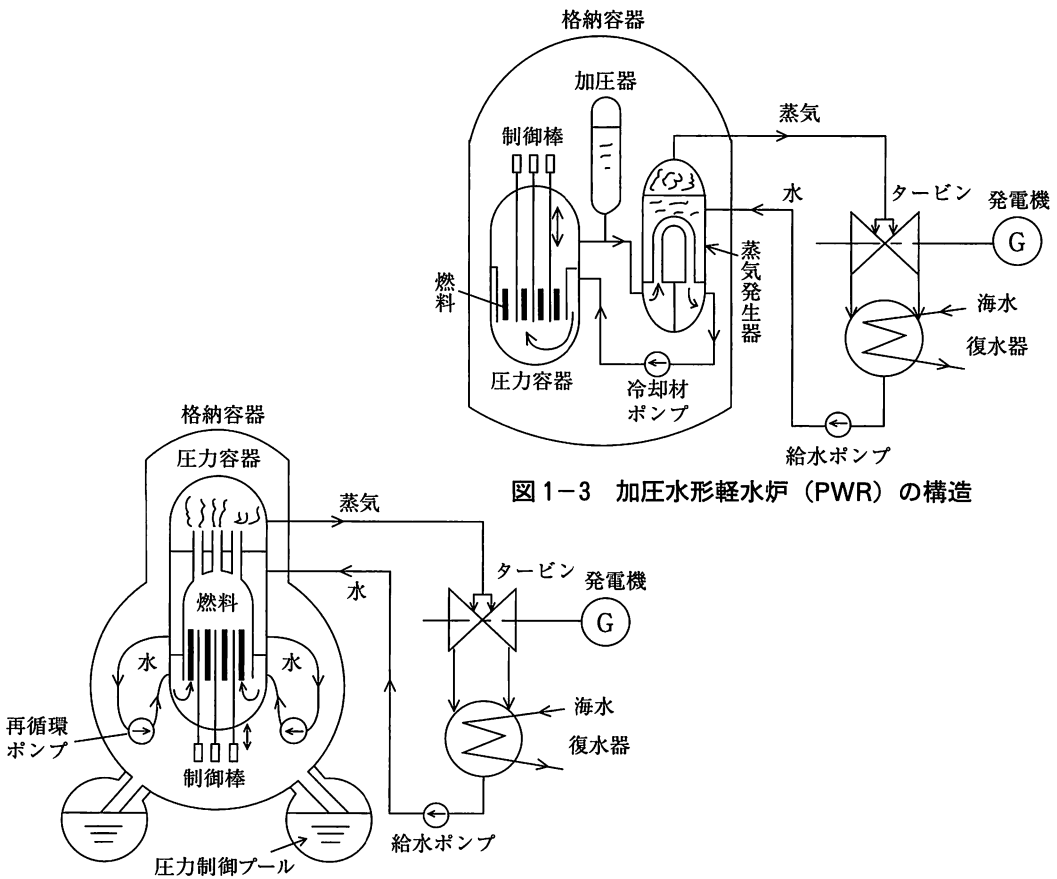


図1-4 沸騰水形軽水炉 (BWR) の構造

【例題 1-5】

(平成 16 年)

分散型電源について誤っている記述は次のうちのどれか。

- ① 太陽電池は、日射量や温度によって出力特性が刻一刻と変化するため、出力電力が最大となるようパワーコンディショナにより最大電力追従制御が行われる。
- ② 風力発電機の連系方式には、発電機の発生交流電力をそのまま電力系統に連系する AC リンク方式と、発電機の発生交流電力を整流器で直流電力に変換してその電力をインバータで交流電力に変換して電力系統に連系する DC リンク方式とがある。通例、同期発電機は AC リンクされ、誘導発電機は DC リンクされる。
- ③ 燃料電池は水素と大気中の酸素とを化学的に反応させることにより直接電気を発生させる装置である。電解質等の相違によって、燃料電池にはりん酸形、溶融炭酸塩形、固体電解質形、固体高分子形などがある。
- ④ マイクロガスタービン発電装置は圧縮機、タービン及び発電機にて構成され、燃焼ガスによりタービンを高速に回転させ、直結または減速機を介して結合された発電機により発電する。マイクロガスタービンの容量は大略 1000kW 以下であり、主として 25kW から 259kW クラスのものが多く開発されている。
- ⑤ 分散型電源が連系している電力系統が事故などにより系統電源と切り離された状態で、分散型電源だけで発電を継続し、他需要家に電力供給している状態を単独運転と呼び、系統連系技術要件ガイドラインにより単独運転の防止対策が示されている。

〔解答と解説〕

- ① 正しい記述です。太陽光発電装置は、いわゆる太陽電池と呼ばれるセルに直接太陽光を照射すると、光電効果によって電子が放出され、電力を直接取り出します。発生する電力は直流でインバータにより交流電力に変換し、利用しやすい形に変換したり、余った電力は配電線と連系させ電力会社に売電したりしています。セルには、シリコン太陽電池として単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファス・シリコンや化合物半導体太陽電池としてガリウム・ヒ素等が利用されています。

太陽光発電の長所は、

- ア) 太陽光エネルギーは無尽蔵で半永久的,
 - イ) 光電効果により直接発電するのでクリーンなエネルギー源 (燃料などを燃やさない),
 - ウ) 規模によらず, ほぼ一定の効率,
 - エ) 家庭で電力が得られる (使うところで発生させ, 消費させる, 送電損失がない),
- 短所としては,
- オ) 太陽光のエネルギーは希薄で, 晴天時 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 程度と大きな電力を得るには大きな面積を必要とする,
 - カ) 気象条件により発電力が変化し, 夜間には発電できない,
 - キ) 直流電力が発生する, したがって, インバータが必要,
 - ク) 蓄電池設備や夜間時の電力会社からの買電によるバックアップが必要, などの特徴があります。

太陽光発電から電力を効率よく取り出すため, 最大電力追従制御が行われており, 制御方式には, 山登り制御方式と一定電圧制御方式の2種類があります。山登り制御方式は, 太陽光発電の電圧・電流を検出し電流を小刻みに変動させ, 制御前後の電力を比較して, 動作点を最大電力点まで追従させる方式ですが, 制御装置構成が複雑で, 日射量の変動に伴い追従に失敗する可能性が高いという特徴があります。一方, 一定電圧制御方式は, 動作点の電圧を一定値としてコンバータを動作させる方式で, 制御方式は簡単ですが, 出力電圧と太陽光発電の最適電圧とが異なる状態となります。

- ② 誤った記述です。風力発電の設備規模は年々増大傾向にあり, 1990年代では500~750kW級が主流となっています。現在では1MW級の発電設備も出現し, 沿岸部での風力発電設備群(ウインドファーム)の建設が進められています。出力制御方式には, 構造の簡単さや低保守費の面から失速制御方式(翼に生じる失速現象を利用し出力制御する)と, 風車の大型化に伴うピッチ制御方式(翼のピッチ角を変化させ回転数や出力を制御させる)の2種類があります。

電力系統との連系では, ACリンク方式とDC(AC-DC-AC)リンク方式とがあり, ACリンク方式とは, 風車と結合した発電機から発生する電力を変

圧器を介して直接電力系統に供給する方式で、電力系統と並入するときの電力動揺、変動する風力電力に対する安定な運転と安定な負荷追従性が確保できること、誘導発電機の場合、系統から無効電力をとるので系統は十分な調相能力を持っていることが必要となります。

一方、DC リンク方式とは、風力発電機と系統間に、周波数変換装置を介し、交流発電機から出る交流電力を直流に変換し、さらに商用周波数の電力に変換するものです。こうすることにより、同期はずれの問題がなく、周波数変換装置の出力調整機能による負荷調整が容易となり、並入・解列時の電力系統への影響が小さいという利点があります。しかし、インバータにより高調波を発生させる欠点があります。

同期発電機の場合、風速は常に変動しており、いろいろな周波数の電力を発生させるので、これを直接系統に接続することはできません。そこで、同期発電機を用いる場合は、変動する風速に対し回転速度を制御し、可変速同期発電機として交流出力を得た後、コンバータで直流にし、再度インバータで交流に変換する DC (AC—DC—AC) リンク方式が用いられています。一方、誘導発電機を用いる場合には、系統に直接連系し、定速回転させる AC リンク方式が用いられています。一般的に、DC リンク方式には同期発電機が、AC リンク方式には誘導発電機が用いられています。

なお、風車の形状は水平軸形と垂直軸形があり、水平軸形には揚力形として、比較的大容量機に用いられるプロペラ式 (2 枚翼, 3 枚翼), 低速度大トルク用のマルチ・ベーン形 (多翼形: 水汲み用など) と抗力形としてパドル式, 垂直軸形では揚力形としてダリウス式 (発電用), ジャイロミル式, 抗力形ではサボニウス式などが有名です。

- ③ 正しい記述です。燃料電池発電は、水の電気分解の逆反応を利用し、水素と酸素を高温触媒中で反応させ、直流の電気と熱水を得る発電方式です。燃料としては、天然ガス、メタン、メタノールなどから改質器により水素を生成させ、これと空気 (酸素) を燃料電池のセル内に送り反応させます。

燃料電池の長所は、

- ア) 発電効率が約 38~40% と高く、比較的小形でも高効率を保てる。発生する熱水を利用すればさらに熱効率は向上する、

イ) 通常の汽力発電方式に比べ、排ガスや騒音の問題も少なく、基本的には熱水が排出され、これを利用することにより高い熱効率が得られる。

ウ) LNG やナフサ（粗製ガソリン）を燃料にできる。

短所は、

エ) 発電コストが高い、

オ) 燃料電池の耐久性や信頼性がまだ十分確立していない、

しかし、

カ) 最近では、固体高分子形燃料電池（PEFC）が自動車に応用され今後の発展が期待できる、

キ) りん酸形（PAFC）から熔融炭酸塩形（MCFC）、固体電解質形（SOFC）へ、より動作温度の高い高効率の燃料電池発電システムの研究が進んでいる、などの特徴があります。

また、燃料電池は、水素と酸素が化学反応した結果、水と電気エネルギーを発生しますが、反応によって得られる水の状態量は反応前の水素と酸素の取りうる状態量より小さいので、通常の汽力発電方式と比較し本質的にエントロピーを増大させない発電方式ともいえます。

④ 正しい記述です。マイクロガスタービンの構造は、基本的には通常のガスタービンサイクルを小形にしたものですが、以下の特徴をもっています。

ア) 発電用の大形ガスタービンと異なり、入口温度も約 950℃以下と、特別な冷却を必要としないでタービン翼が高熱に耐えられる温度範囲内で使用、

イ) 効率低下を抑えるため高速回転方式（約 10 万 rpm）を採用、

ウ) ガスタービン出口の高温排ガスは、燃焼用空気を加温させるため熱交換器を利用（再生サイクル）し、熱効率を向上させている（約 30%）、

エ) コンプレッサー、ガスタービン、発電機を組み合わせた一体構造による小形化（30kW 機で 650kg 程度）により経済性を追求、

オ) これにより容量は、20kW 程度から数百（300）kW 程度までのオンサイト形の発電設備を実現しています。

⑤ 正しい記述です。「系統連系技術要件ガイドライン」（以下、ガイドライン）には、低圧配電線、高圧配電線、スポットネットワーク配電線、特別高圧配電線との連系があり、低・高圧配電線との連系は、それぞれ、逆潮流の有り無し

で分類されています。系統連系できるのは、低圧では、50kW 未満の発電設備の場合で、同期または誘導発電機を用いた場合は、原則逆潮流がないときに限られています。太陽光発電のみの場合は、逆潮流があってもガイドラインの設備対策を行えば連系できます。高圧配電系統との連系はガイドラインの対策を行えば可能です。スポットネットワーク配電線、特別高圧配電線も、原則単独運転禁止です。

参考文献：『燃料電池とその応用』第1版「オーム社」

【例題1-6】

(平成11年)

発電に関する記述で誤っているものは、次のうちどれか。

- ① 太陽電池は、半導体のpn接合により太陽エネルギーを直接電気エネルギーとして取り出すものである。一般にインバータを用いて直流を交流に変換して使用される。
- ② 燃料電池は、天然ガスなどの燃料を電気分解して化学エネルギーとして蓄え、電気エネルギーとして必要なときに取り出すものである。
- ③ 揚水発電は、上部・下部の2つの貯水池を利用して軽負荷時に揚水し、重負荷時に発電する方式のものである。
- ④ 風力発電装置は、風の運動エネルギーを利用して発電するもので、単位面積当たりの風力エネルギーは風速の約3乗に比例する。
- ⑤ 地熱発電設備は、地下のマグマなどの地熱によって加熱された高温・高圧の蒸気を取り出し、タービンを駆動して発電するもので、燃料費が不要である。

〔解答と解説〕

- ① 正しい記述です。詳細説明は例題1-5を参照してください。
- ② 誤った記述です。燃料電池は、水の電気分解の逆反応で、水素と空気中の酸素とを化学反応させて、電気エネルギーと水を発生させます。
- ③ 正しい記述です。揚水発電方式について解説します。揚水発電方式とは、需要地での消費電力の少ない夜間に、原子力発電などの余剰電力を利用して、揚水式ダムの下部貯水池から水をくみ上げ、上部ダムに貯水し、消費電力の先鋭な昼間のピーク時に上部貯水池の水を流し発電する方式で、主にピーク負荷調整用として利用されてきました。発電開始や最大出力までの運転時間が短く出