

[研究報告]

ごみ焼却施設の大規模改修に伴う余熱利用の高度化 —特に発電設備の導入に関する検討方法—

On the planning method about converting an old NSW incineration plant to a power plant

佐藤 幸世*、藤吉 秀昭*

Kousei SATOU and Hideaki FUJIYOSHI

1. はじめに

最近の新設ごみ焼却施設においては、廃棄物循環型社会基盤施設整備推進の考え方に基づいて、高度な余熱利用が図られようとしている。特に、発電の取組に関しては目ざましいものがあり、高温高圧ボイラによる発電の高効率化や、コンバインドシステム、再熱サイクルによる発電効率の向上等が試みられている。

ところが、既存のごみ焼却施設は処理規模が大きい割にその余熱をほとんど利用していないものが多い。従って、旧来の施設を大規模に改修し延命化する際に、余熱利用の高効率化を最大限追求しようとする社会的な要請が高まっている。

しかしながら、既存施設の改修の場合は、新設の場合と違って既存工場棟の建築上及び敷地条件上の種々の制約があり、新規に建設する場合より計画及び設計がむずかしい。

そこで、ボイラ炉の大規模改修の具体的計画事例を検討して、発電プラントへの変換計画の要点と留意事項をまとめたので以下に報告する。

2. 余熱利用高度化の種類

余熱利用高度化を目的とした改造としては下記のケースが考えられる。

①水噴射炉 場外余熱利用の拡大 回収熱量増加、

貯湯槽の増加

- ②水噴射炉 ガス冷却設備のボイラ化
- ③ボイラ炉 熱負荷増大に伴う回収蒸気量の増大化
- ④ボイラ炉 場外余熱利用の高度化、拡大
- ⑤ボイラ炉 発電化
- ⑥ボイラ炉 タービン容量のアップ、蒸気条件の高度化（過熱度向上）、発電容量の向上
- ⑦ボイラ炉 売電化、受電の特別高圧化
- ⑧ボイラ炉 コンバインド発電化

本報告においては、⑥のケースを取り上げて計画の要点及び留意事項を示す。

計画事例はボイラ付き大型連続炉であるが、発電設備は設けておらず、発生した蒸気は場内外で暖房・冷房及びプールへの給湯に用いるだけである。建設後17年を経過しプラント全体が老朽化したことから全面的な大規模改修（リフォーム）を計画した。計画に当たっては極力余熱利用を高度化する観点から発電を積極的に行うことにしており。既存焼却施設と大規模改修後の施設概要は表1に示すとおりである。

3. 発電計画の検討内容

1) 検討項目及び検討手順

既存のごみ焼却施設の大規模改修を実施する際に、余熱利用の高度化として発電設備を新たに設置する場合の検討項目及び検討内容、留意事項は表2のとおりであり、特に発電計画の検討手順は図1のとおりで検討要素が多く複雑になる。この中で特に留意すべきことは、次の諸点である。／

* 1)日本環境衛生センター東日本支局環境工学部
Department of Environmental Engineering,
East Branch, Japan Environmental Sanitation
Center

表1 既存焼却施設と大規模改修後の施設概要

項目	既存施設	大規模改修後
施設規模	540t/日 (180t/24h×3炉)	540t/日 (180t/24h×3炉)
計画ごみ質	800~2,000 kcal/kg (3,350~8,370 kJ/kg)	1,500~2,700 kcal/kg (6,300~11,300 kJ/kg)
設備概要		
受入供給	ピット&クレーン方式	ピット&クレーン方式
燃焼	ストーカ方式	ストーカ方式
燃焼ガス冷	廃熱ボイラ式 (常用圧力16kg/cm ² ≈ 1.6MP)	廃熱ボイラ式 (常用圧力27kg/cm ² ≈ 2.7MP) (過熱蒸気温度300°C)
排ガス処理	電気集塵機、 乾式塩化水素除去装置	バグフィル、触媒脱硝装置 乾式塩化水素除去装置
余熱利用	場内給湯、冷暖房、 プールへの蒸気供給	発電、場内給湯、冷暖房、 プールへの蒸気供給・給電
通風	平衡通風方式	平衡通風方式
灰出し	灰出しコンベヤ 灰ピット&クレーン方式	灰押出装置 灰ピット&クレーン方式
発電関連設備	なし	タービン発電機棟、排気コンデンサ棟を各々別棟で計画 タービン： 抽気復水タービン 発電出力9000kW 余剰電力を売電 供給蒸気量60t/h 入口蒸気25kg/cm ² (2.5MP) 270°C 排気圧力0.4ata (0.04MP)
計画の特徴	焼却処理能力を最大限確保するために、既存施設と同規模とし、 計画高質ごみを2,700 kcal/kg (11,300 kJ/kg) まで35%上げた。 従って、計画最大熱負荷は現状の35%アップとなっている。 工場棟内にタービン、コンデンサ、受変電室を設置するスペースがないために、工場棟外に別棟で計画した。敷地が狭いためこれらの別棟計画が大変な制約を受けた。 別棟計画に当たっては、極力敷地内現存樹林を保存し、別棟による景観の変更を少なくし周辺への圧迫感を小さくした。また、日影や騒音による周辺環境への影響も極力軽微にするよう配慮した。 周回道路や作業動線は必要なものを確保し、職員駐車場やごみ・灰の運搬車の動線を確保した。	

清掃工場を新設する場合は、計画ごみ質、計画処理規模によって計画ボイラが設計され、これにより蒸気として回収される熱量のうちタービンに流しうる有効蒸気量によって実現可能な発電出力が決定できる。ところが、大規模改修の場合はまずボイラそのものの設置が既存建屋に収まりきれないことや荷重の増加等により焼却炉の規模を小さくせざるを得なくなる可能性をもっている。ま

た、発電関連設備としてタービン・発電機を設置するスペース、タービン排気コンデンサ設置スペース、場合によっては特別高圧受変電設備設置スペースが新たに必要となる。このように必要とする空間がかなり増加することから、多くの場合既存工場棟とは別棟でかつ円滑な管理動線を確保できる配置で設置場所を計画しなければならない。敷地に余裕のないところではコンデンサ用の敷地の確

表2 発電計画を進める上での検討項目

主要検討項目	検討内容及び留意事項
ボイラ	空間的制約 荷重上の制約 作業動線上の制約 蒸気条件（圧力、過熱温度、蒸気吸支等） ボイラ、過熱器、エコノマイザの大きさ 及び荷重条件、形状 ストップローブの配置
蒸気タービン発電機	発電出力、タービン形式 供給蒸気条件（蒸気圧力、温度、供給量、抽気量） 排気条件（蒸気圧力） 設置場所、収納建物の制約（空間面） 装置の大きさ、設計荷重 蒸気配管計画、管理動線
タービン排気コンデンサ	コンデンサ形式、冷却能力 設置場所、収納建物の制約（空間面） 装置の大きさ、設計荷重 蒸気配管計画、管理動線
受変電設備	受変電容量 設置場所、収納建物の制約（空間面） 装置の大きさ、設計荷重 管理動線
ボイラ・タービン関連補機	設置場所 管理動線
余熱利用計画	場外熱供給の見直し、場外給電の検討
必要人材の確保	ボイラタービン主任技術者 電気主任技術者

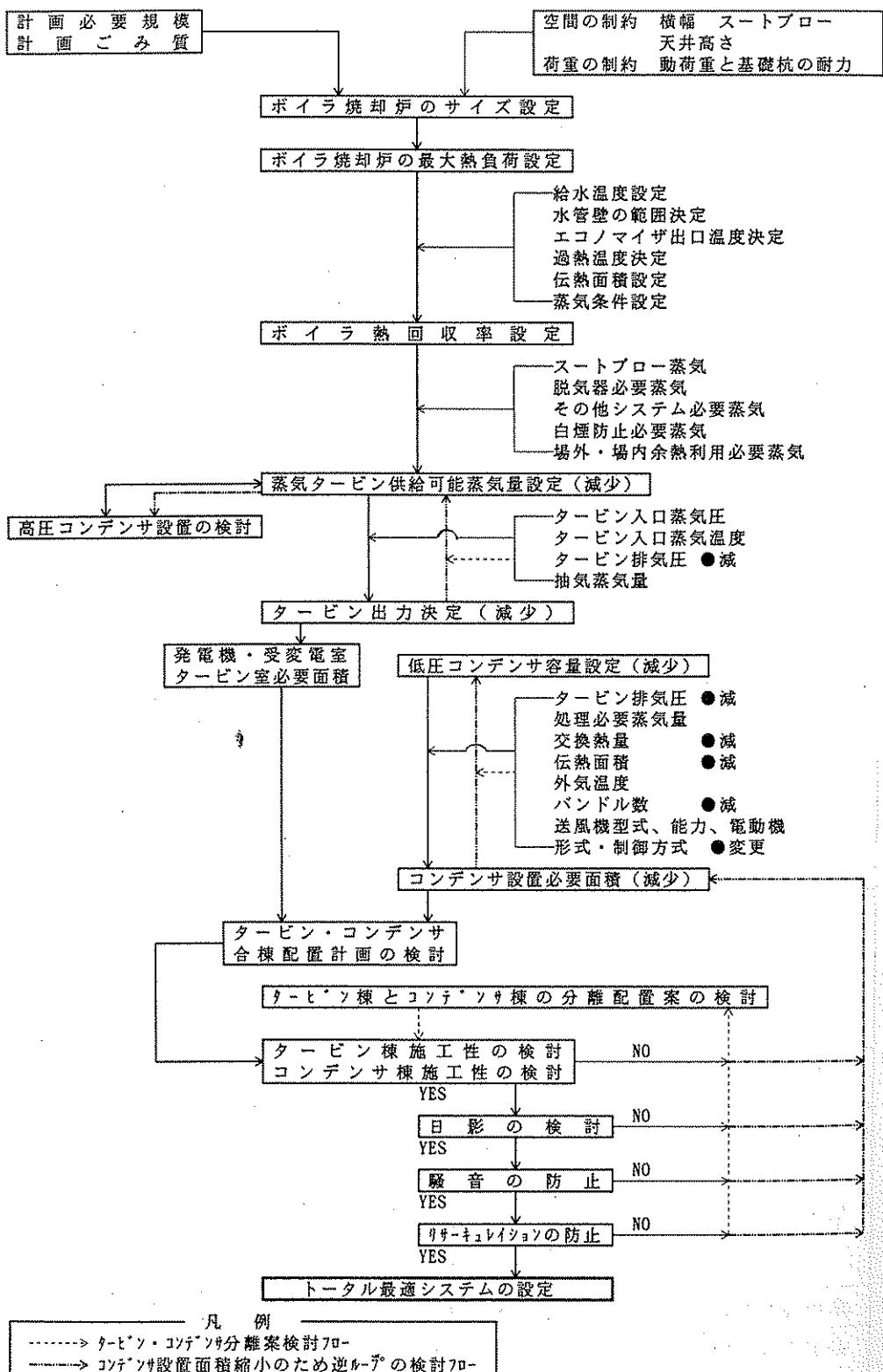


図1 発電導入の検討手段

保に制限が出てくる場合がある。この様なときは、設置面積が狭くて済むタイプのコンデンサを選択することや、タービン排気圧力を上げて必要伝熱面積を小さくする等の検討が必要となる。これらの場合でも十分な設置スペースが確保できない場合はタービン容量を下げる必要がある。また、日影等の関係で建屋高さに制限があるとタービンとコンデンサを分離して設置することを検討せざるを得なくなる。別棟計画に当たっては騒音防止等にも配慮しなければならない。敷地の広さや日影規制等の制約から逆に発電設備の仕様を変更していくフィードバック検討項目と流れを図中破線及び一点鎖線で示している。

2) 配置計画の検討

(1) 発電関連設備設置場所

大規模改修では、既存工場棟内に発電設備の設置場所を確保することは、ほとんど不可能であり、敷地内に工場棟とは別にタービン・コンデンサ棟を確保せざるを得ないケースが多い。蒸気タービン発電機と排気コンデンサを敷地内のどの場所に設置するかは非常に大きな検討課題である。既存敷地内の配置計画の検討概念図は図2のとおりである。

増築棟の建設場所の決定手順はまず、既存工場敷地内でタービンコンデンサ棟（別棟の場合もある）を建設できる可能性のある場所（候補地）を選出する。図3は建設可能性のある場所を取り上げた例である。

タービンコンデンサ棟の計画例は図4のとおりであり、設置スペースの大小により、計画できるタービンコンデンサ棟の大きさ、形状が変わり、コンデンサの伝熱面積が変わるためにコンデンサ容量も変わることになる。

次にその場所で実際に建築可能なスペースを設定し、施工性、動線障害の有無、日影、騒音等の検討により最も適切な場所を選ぶ。

(2) 発電設備の管理動線計画

発電設備を計画する場合は、タービン発電機及び受変電設備の監視及び良好な管理動線の確保が必要である。別棟計画の場合は、タービン発電機室、特高受電室が中央制御室から離れるのでテレビカメラによる遠方監視が基本となる。同時に迅速な専用通路の計画が必要となる。

管理動線計画は図5のように中央制御室から渡り廊下等を利用して、関係諸室へ向ける計画とする必要がある。

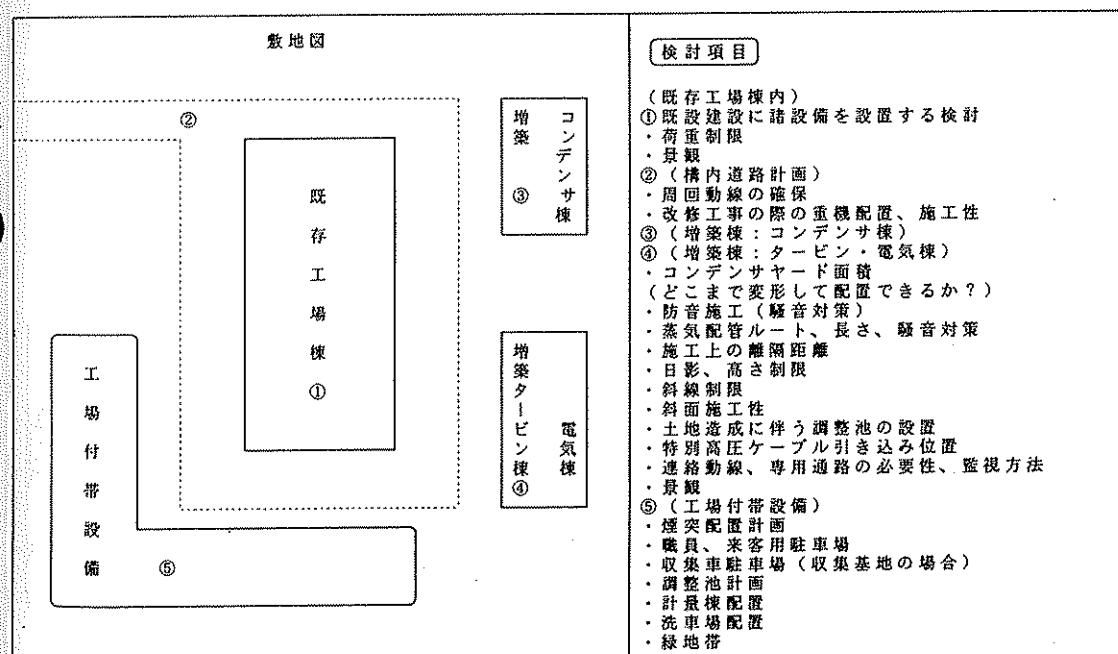


図2 敷地内配置計画検討概念図と検討項目

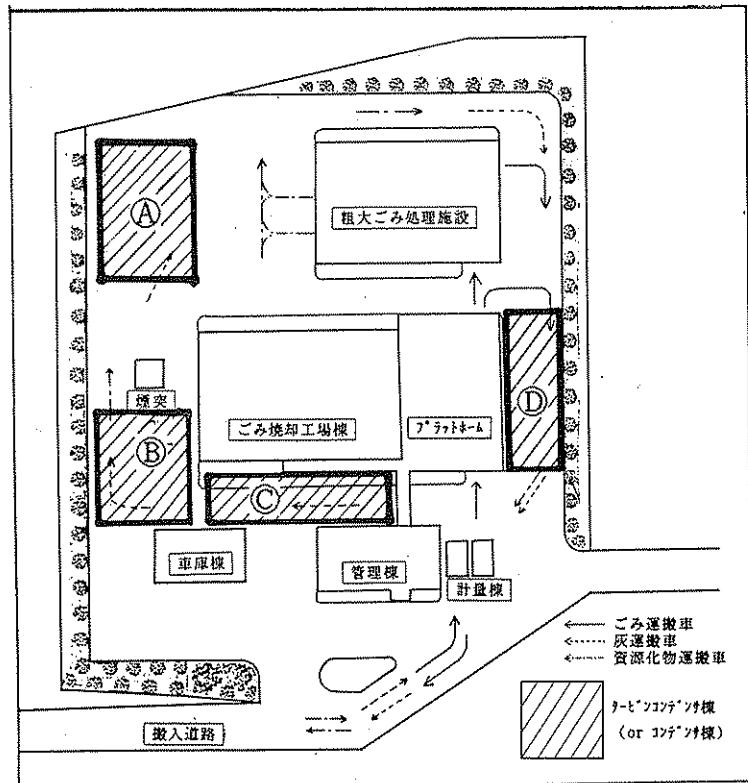


図3 タービンコンデンサ棟の
増築可能候補地（例）

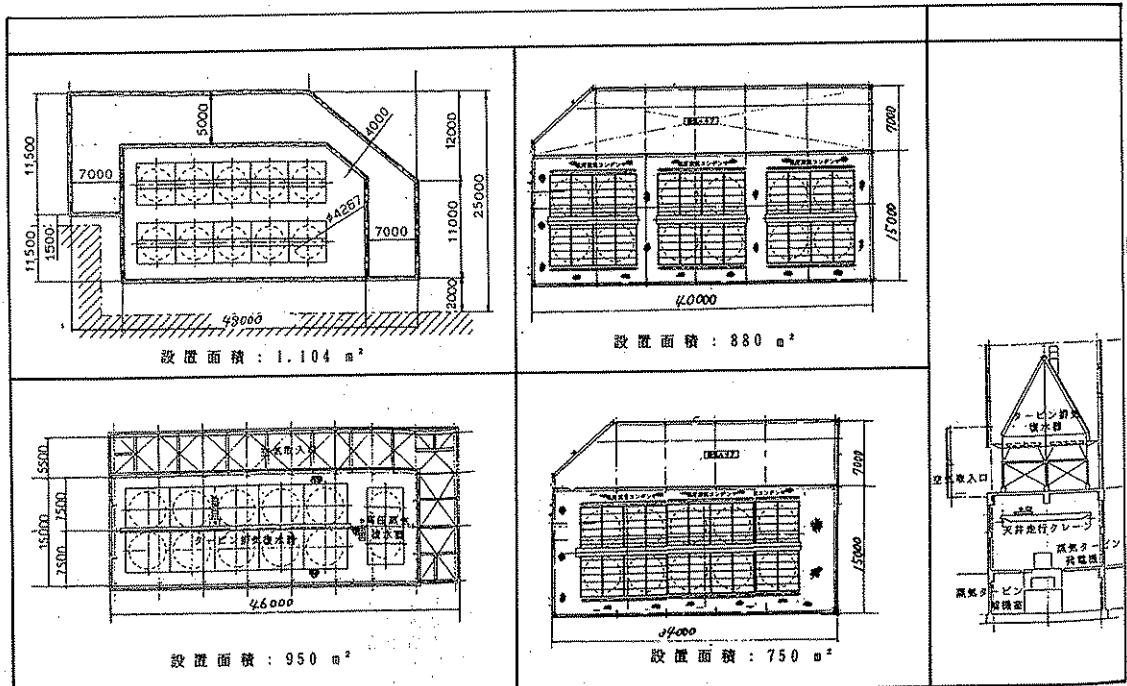


図4 タービンコンデンサ棟計画例（設置場所の違いによる計画例）

(3) 別
設
が
斜
ス
地
高
だ
分
3)
ン
あ
装
(1)
定
給
未
の
方

(3) 別棟の建築規制

別棟を新たに増築する場合は、既存の施設を建設した時にはなかった建築上の規制を受けることがある。規制内容としては高さ制限、日影規制、斜線制限、造成に伴う調整池確保等がある。

本計画事例では当初タービンコンデンサ棟を敷地境界近くに計画していたが、日影規制から建物高さを高くするコンデンサを敷地境界からできるだけ離し（別棟）かつ、タービンとコンデンサも分離せざるを得なくなった。

3) 発電出力の決定のための検討

上記配置計画の検討と平行して改修後のタービン発電機のおおよその容量を算定しておく必要がある。発電については発電出力及び発電関連主要装置の設置場所の確保が大きな検討項目となる。

(1) 発電出力

発電出力は通常、蒸気タービンの能力により決定され、タービン入口蒸気条件（圧力、温度、供給量）と排気圧力により算出することができる。

タービン排気圧力と発電出力の関係は図6のとおりであり、タービン排気圧力と排気コンデンサの伝熱面積の関係は図7のとおりである。排気圧力を下げるほど（発電出力を大きくしようとするほど）排気コンデンサの必要伝熱面積は大きくな

る。従って排気コンデンサの設置スペースに制約があり、狭い場所に計画せざるを得なくなると排気コンデンサの伝熱面積が小さくなり、コンデンサ能力が低下し発電出力が下がることになる。このような場合は、結果的に蒸気タービンへ供給する蒸気量が減り、そのため余剰蒸気を冷却するための高圧コンデンサを設置することの検討も必要になる。排気コンデンサの設置スペースは、発電出力を制約する大きな要素となる。

(2) 蒸気タービンと排気コンデンサの分離配置案の検討

タービンの排気は排気コンデンサにより冷却され、復水される。タービン・コンデンサの設計は蒸気タービンの直上階に排気コンデンサを配置する形式が一般的であり、そのときのタービン排気圧力と排気コンデンサの入口圧力の圧力差を0.02 kg/cm²（約20kPa）として設計することが多い。例えば、タービン排気圧力が0.4ataのときは排気コンデンサの入口圧力は0.38ataとして設計される。

排気コンデンサの設計計算方法は表3のとおりであり、蒸気流量、コンデンサ出入口の蒸気エンタルピ差及び冷却用の空気温度が高くなるほど必要伝熱面積が増加する。また、逆に排気圧力をあ

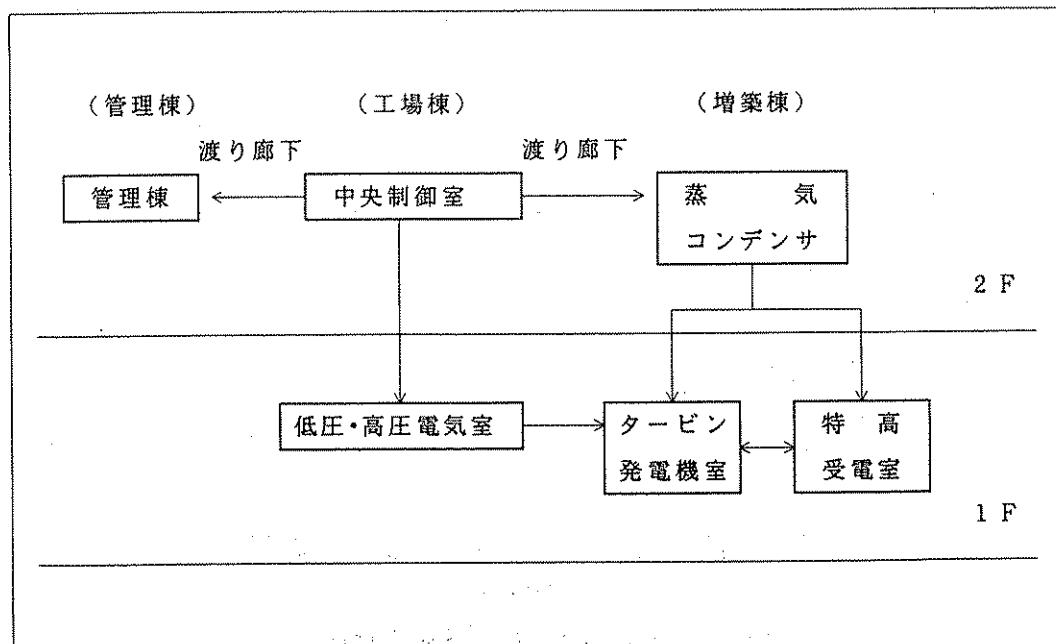


図5 中央制御室—電気室—タービン発電機室の動線計画例

表3 タービン排気復水器の設計計算

【 計算方法 】	
復水器の熱計算は下記の式に従って行う。	
$F \geq F' = \frac{Q}{K \times \theta_m}$	
F : 実在伝熱面積	[m ²]
F' : 必要伝熱面積	[m ²]
Q : 交換熱量	[kcal/h] [kJ/h]
$Q = \dot{W} \times (h_1 - h_2)$	
\dot{W} : 蒸気流量または復水流量	[kg/h]
h_1 : 復水器の入口蒸気エンタルピ	[kcal/kg] [kJ/kg]
h_2 : 復水器の出口蒸気エンタルピ	[kcal/kg] [kJ/kg]
K : 総括伝熱係数	[kcal/m ² h°C] [kJ/]
θ_m : 平均温度差	[°C]
$\theta_m = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}$	T_2  t_1
$\varrho = \frac{(T_1 - t_1)}{(T_1 - t_2)}$	T_1  t_2
T_1 : 復水器入口蒸気温度	[°C]
T_2 : 復水器出口復水温度	[°C]
t_1 : 空気入口温度	[°C]
t_2 : 空気出口温度	[°C]
$t_2 = \frac{Q}{\dot{V}_L \times 3,600 \times 1.293} + \frac{273}{273 + t_1} \times 0.24$	
\dot{V}_L : 空気流量	[m ³ /s]

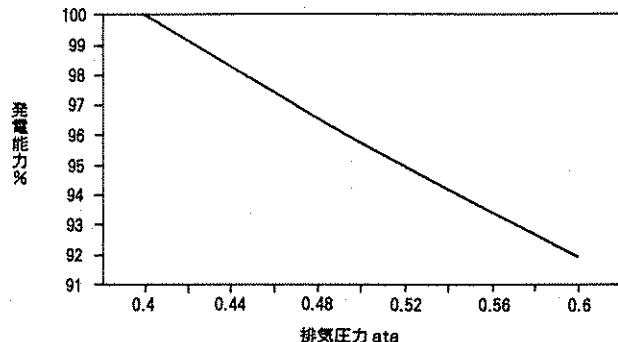


図6 発電出力とタービン排気圧力（例）

表4 配置場所(候補地)別のタービン発電機及び排気コンデンサの比較検討表

	A案	B案	C案	D案
蒸気タービン発電機				
蒸気タービン蒸気条件				
入口蒸気量 *1 (t/h)	59.88	60.81	60.42	58.81
入口蒸気圧力 (ata)	22.00	22.00	22.00	22.00
入口蒸気温度 (°C)	275.00	275.00	275.00	275.00
入口蒸気エンタルピ (kcal/kg)	706.90	706.90	706.90	706.90
出口蒸気圧力 (ata)	0.40	0.60	0.50	0.25
出口蒸気温度 (°C)	75.42	85.45	80.86	64.54
出口蒸気エンタルピ (kcal/kg)	581.20	595.03	589.12	566.50
蒸気タービン系の効率(概略想定)				
タービン効率 (%)	76.00	73.50	74.50	78.00
発電機効率 (%)	95.00	95.00	95.00	95.00
減速機効率 (%)	97.50	97.50	97.50	97.50
発電機出力(最大) (kW)	8,100	7,300	7,600	8,800
排気復水器				
設計条件		*2		
入口蒸気量 (t/h)	65.90	66.90	66.50	64.70
入口蒸気圧力 (ata)	0.38	0.58	0.48	0.23
入口蒸気温度 (°C)	74.19	83.90	79.85	62.69
入口蒸気エンタルピ (kcal/kg)	584.40	595.03	589.12	566.50
出口復水温度 (°C)	74.19	83.90	79.85	62.69
出口復水エンタルピ (kcal/kg)	74.17	83.91	79.85	62.66
交換熱量 (kcal/h)	33,624,000	34,194,000	33,866,000	32,598,000
設計値等				
入口空気温度 (°C)	35.00	35.00	35.00	35.00
出口空気温度 (°C)	59.30	64.30	62.80	52.60
空気量 (Nm ³ /s)	1,239.88	1,045.73	1,091.58	1,659.64
対数平均温度差 (°C)	25.11	32.05	28.74	17.43
総括伝熱係数 (kcal/m ² h C)	25.60	25.60	25.60	25.60
必要伝熱面積 (m ²)	52,310	41,680	46,020	73,040
設計伝熱面積 (m ²) 約	53,800	42,900	47,400	75,200
送風機 数量 (台)	10	5	6	14
風量 (Nm ³ /s)	124	210	182	119
(m ³ /s)	140	236	206	134
寸法 (mm)	4,267	5,545	5,545	4,267
電動機 (kW)	37	75	55	37
騒音値 (dBA) 約	94.0	96.5	95.0	93.5
(PWL)				

*1: 蒸気タービン送気蒸気量 (蒸気パラスから)

*2: 機器余裕率は小さくなっている。

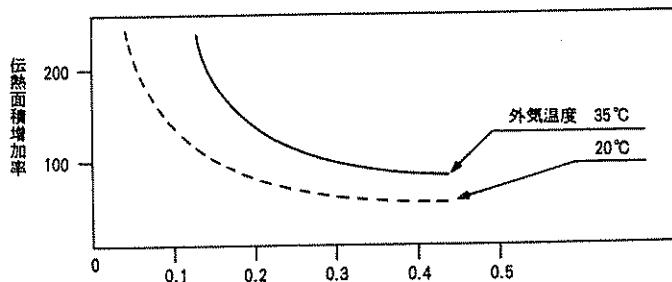


図7 タービン排気圧と蒸気コンデンサ
伝熱面積増加率

げるほど必要伝熱面積が小さくなることになる。

タービン・コンデンサの配置場所の違いによる排気コンデンサの伝熱面積、蒸気条件及び発電出力の比較検討結果は表4のとおりである。

しかしながら、配置の制約（高度制限等）により、蒸気タービンと排気コンデンサを離して配置せざるを得ない場合は両者の圧力差が大きくなる傾向がある。本検討事例では、蒸気タービンと排気コンデンサの位置関係は図8のように表すことができ、蒸気タービンと排気コンデンサの距離 x が大きくなると、排気コンデンサ入口の圧力が0.38ata時の蒸気タービン排気圧力は配管損失が増えるため、0.4ataよりも大きくなる。従って、蒸気タービンの断熱熱落差が小さくなり発電出力が小さくなる。タービンとコンデンサを離した場合に圧力差を小さくするためには排気管径を大きくする等の方法がある。

タービンと排気コンデンサを離した場合の発電

出力とタービン排気圧力、排気管の大きさ、長さ等の関係は表5のとおりである。

本検討事例では設置スペースの制約のため、タービン発電機と排気コンデンサを離して配置し、別

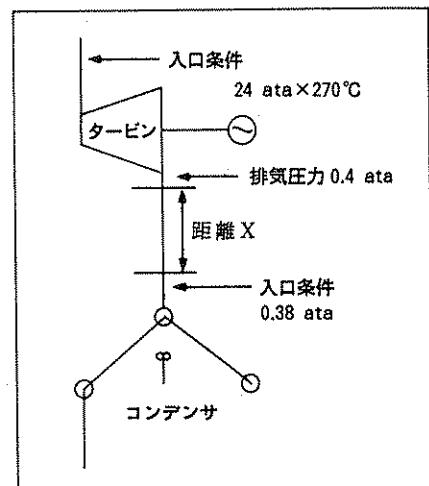


図8 タービンと排気コンデンサの位置関係

表5 発電出力と蒸気コンデンサの排気圧力、排気管の大きさ長さの関係
(タービンと排気コンデンサを離した場合)

	設計値	影響	コンデンサ大きさ
タービン排気圧力	①高くする	発電出力が小さくなる	小さくなる
	②低くする	発電出力が大きくなる	大きくなる
排気管の大きさ	太くする	圧力損失が少なくなる	② 大きくなる
	細くする	圧力損失が多くなる	① 小さくなる
排気管の長さ	長くする	圧力損失が多くなる	① 小さくなる
	短くする	圧力損失が少なくなる	② 大きくなる

棟として計画した。図9はコンデンサ単独棟の計画であり、既設周回道路上に配置し、道路通行を可能にするため有効高さ3.8m以上の空間を確保している。別棟の基礎は独立とし、煙突基礎、既存建物基礎と干渉しないように計画した。

4) 騒音対策

本改修計画のうち、騒音公害防止について考慮が必要なのは工場棟内に収納することができない排気コンデンサ（冷却ファンの音が主体）と屋外設置の蒸気配管からの音である。

(1) 排気コンデンサの防音対策

排気コンデンサ本体の騒音源は冷却用ファンの音が主体であり、騒音レベルは表6のとおりである。この騒音対策としては以下の方法がある。

<騒音対策>

- ・蒸気コンデンサファンは低騒音形を使用する。
- ・建屋壁は遮音性の優れる部材（防音壁）を使用する。
- ・建屋壁に吸音性の優れる吸音材を施工する。（吸音材は低周波音を考慮したものとする。）
- ・蒸気コンデンサの吸気口、排気口に吸音セルを施工する。

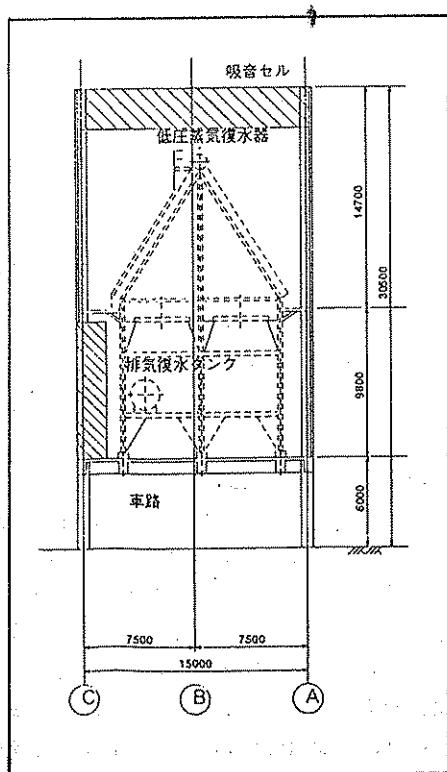


図9 蒸気コンデンサ単独棟計画例

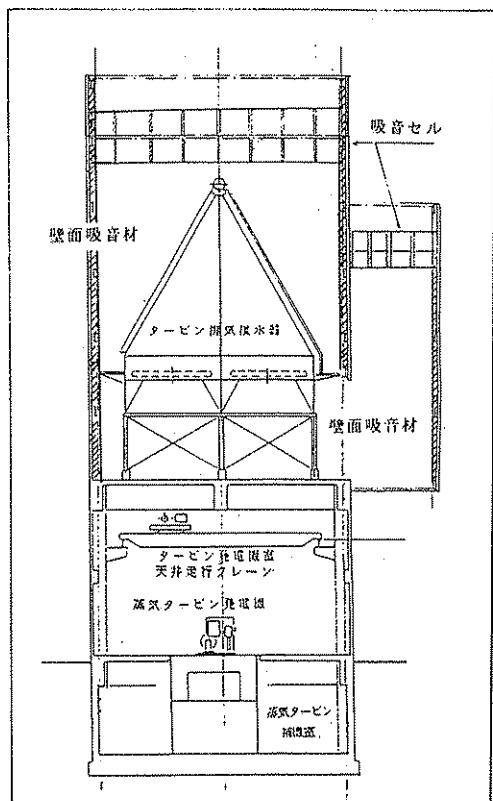


図10 蒸気コンデンサ防音対策例

・蒸気コンデンサの吸気口、排気口を直接騒音の影響の少ない方向に配置する。

騒音対策例は図10に示すとおりである。

(2) 蒸気配管からの騒音対策

タービンとコンデンサを離して計画すると、蒸気配管（既設工場棟からタービン棟への高圧蒸気配管及びタービン棟からコンデンサ棟への排気配管）からの騒音の発生がある。防音対策として蒸気配管を遮音材で囲う例を図11に示す。

表6 蒸気コンデンサ、冷却ファンの騒音レベル例

騒音：ファン1台当りのPWL=94.5 dB (A) 単位dB (A)									
周波数分析値 Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	0.1A
PWL	76	84	90	92	90	88	86	82	97

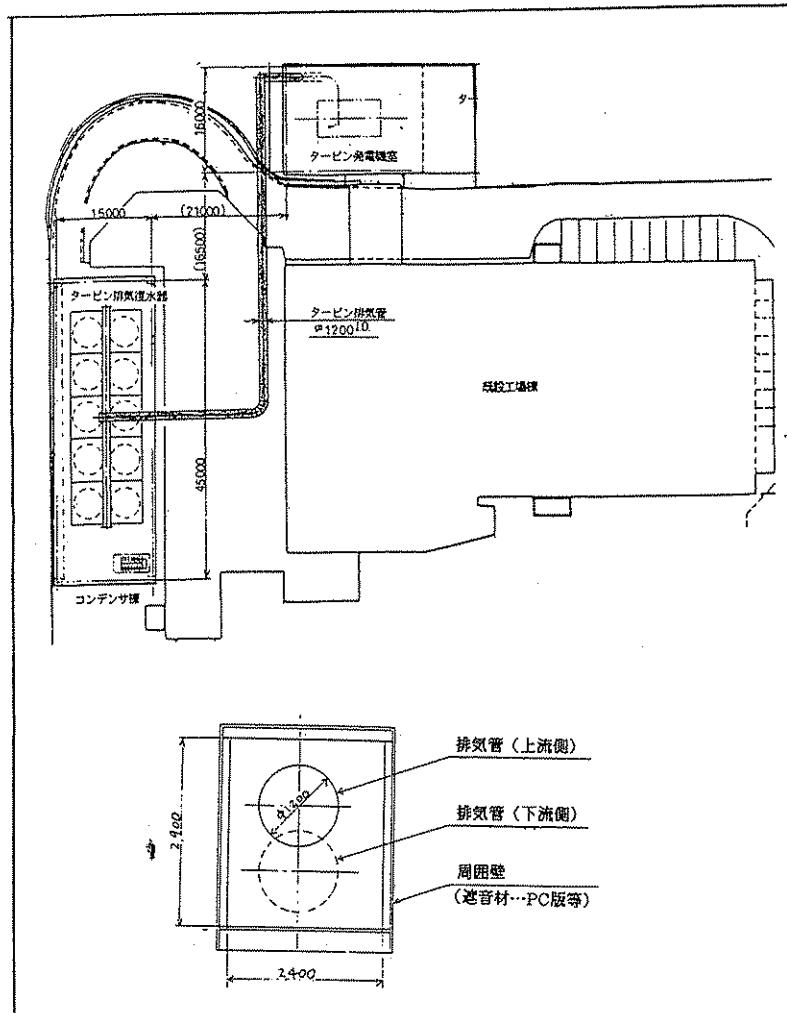


図11 蒸気配管の騒音対策

コンデンサの騒音は、低周波成分がコンデンサの上面から伝播し回折現象により地上に到着することによってひきおこされやすい。この点への配慮が必要である。

コンデンサの騒音伝播検討結果は図12、図13に示すとおりである。

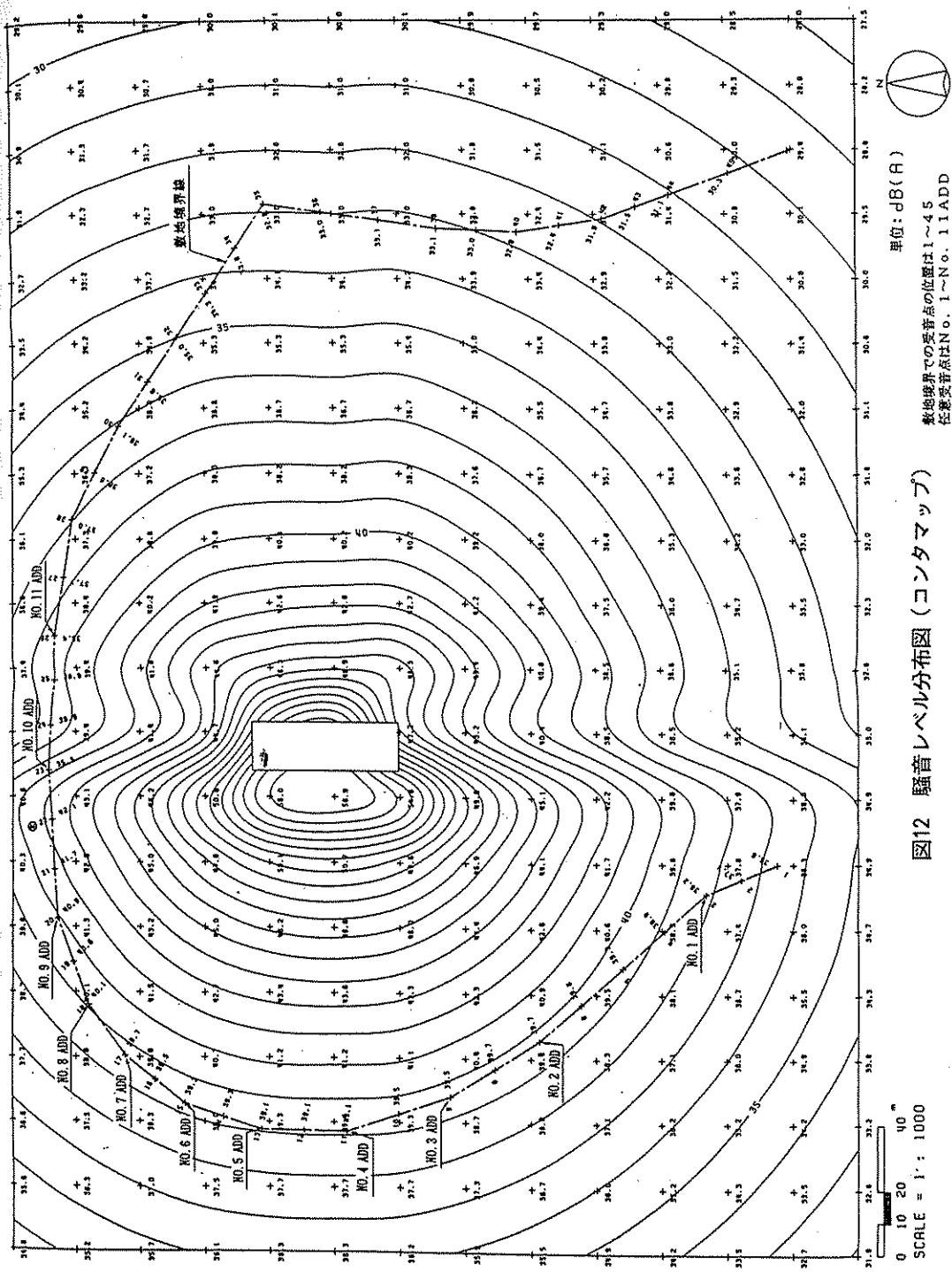
4.まとめ

ボイラ炉の大規模改修例を検討しながら、主に余熱の高度利用を図ろうとするときの検討手順及び検討の留意点をまとめると以下のとおりである。

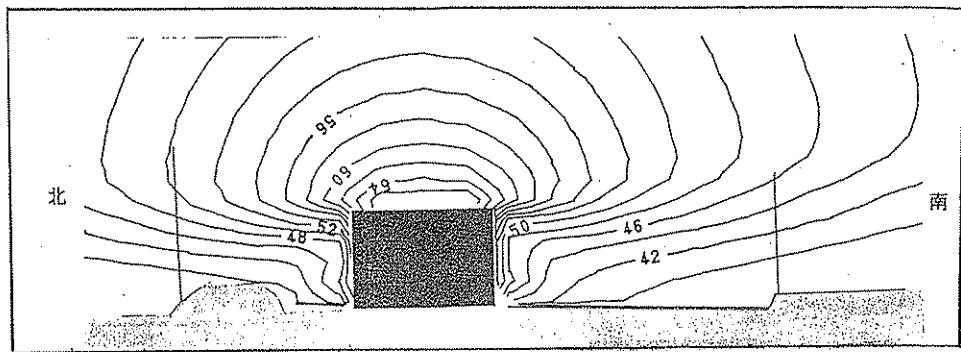
- (1) 大規模改修に伴う余熱利用の高度化として発電化の検討方法・手順を示した。
- (2) ボイラの大型化、タービン発電機、コンデン

サ及び電気室等の設置スペースが必要であることから、別棟計画を検討した。

- (3) 別棟計画にあたっては、既存工場棟とのスムーズな管理動線を確保する必要がある。
- (4) その際はコンデンサ冷却ファンの騒音に留意する必要がある。
- (5) 建物の高度制限や日影規制があると、タービンの直上に排気コンデンサを設置できなくなる。この場合はタービンとコンデンサを分離してそれぞれ別棟として計画せざるを得なくなる。この際、離す距離、管径等が蒸気圧のロスに影響し、タービン排気圧をあげることになる。その結果、発電出力が低下するので留意する必要がある。また、蒸気配管からの騒音にも対策が必要である。



るこ
ム一
留意
一ビ
する。
てそ
のこ
影響
その
要が
が必



排気側の騒音により地表面よりも高い所で騒音値が高くなる

図13 騒音レベル分布図（断面コンタ）

- (6) コンデンサの騒音は給排気口から発生する低周波の騒音の回折による伝播が大きな影響を与えるので、その対策が必要である。
- (7) 用地不足の場合はコンデンサ排気圧をあげて、必要伝熱面積を小さくする方法もある。
- (8) 更にコンデンサを小さくせざるを得ないときは、タービンに流す蒸気量を減らす検討が必要である。この場合、逆に高圧コンデンサが別に必要となるので、その場所も考える必要がある。