

地熱発電と温泉との共生への道

野田 徹郎¹⁾²⁾

(平成 23 年 10 月 24 日受付, 平成 23 年 11 月 19 日受理)

Steps to Harmonious Coexistence of Geothermal Power Generation and Hot Spring Utilization

Tetsuro NODA¹⁾²⁾

1. 地熱環境問題とエネルギー危機

21 世紀に入る前から、人類が直面する大きな問題は、大気中の二酸化炭素増加が原因とされる地球環境問題と、石油などの化石燃料の枯渇によるエネルギー危機だと言われてきた。21 世紀に入ると、実際、その影響は我々の周りでじわじわと表れているように見えてきた。地球環境への影響は、大気中の二酸化炭素濃度、世界の平均気温、世界の平均海面水位を徐々にではあるが確実に上昇させ、一方、北極の海水の面積が確実に減少しているようにその影響は極地にも及んでいる。これらの気候への影響は世界各地で目立っている異常気象と関係があるとされている。エネルギー面では、我々が日常使用するガソリンや灯油の値段は 10 年前の倍のレベルであり、世界の原油価格は急上昇し、1 バレルが 100 ドルを超えても驚かなくなった。

平成 23 年 3 月 11 日に東日本で起こった大地震は、この問題を一層深刻化させ、新しい展開をもたらしたように思われる。大津波の来襲により起こった東京電力福島第一原子力発電所の事故は、我々がなござりにしていた原発の高レベル放射性廃棄物の処分について、まだ処分地の候補さえ決まっていなかったことを改めて思い起こさせ、それに加えて、今後、福島原発の瓦礫の処分や各地の原発の廃炉をどう処分するかという大きな環境問題があることを知らされた。この原発事故はまた、日本のエネルギー供給の弱点も暴き出し、オイルピークを過ぎた地球規模での史上最大のエネルギー危機の到来が、現実味を帯びた形で我々の眼前に姿を見せることとなった。

地熱資源は、他の自然エネルギーとともに二酸化炭素の排出が少なく、また、国内には、2,347

¹⁾産業技術総合研究所 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第七。 ¹⁾ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.

²⁾日鉄鉱コンサルタント 〒108-0014 東京都港区芝 4-2-3 NOF 芝ビル 3 階。 ²⁾ Nittetsu Mining Consultants Co., Ltd., NOF Shiba Building, 2-3, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014, Japan.

万 kW と試算される豊富な資源の存在が推定されている（地熱発電に関する研究会，2009）。これに対し，2009年度の統計データ（自然エネルギープラットフォーム，2011）によると，いわゆる再生可能エネルギーの発電量と全体発電量に占める割合は，多い順に，小水力発電 17,280 GWh (1.51%)，バイオマス発電 11,624 GWh (1.01%)，風力発電 3,830 GWh (0.33%)，太陽光発電 2,966 GWh (0.26%)，地熱発電（2008年度実績）2,765 GWh (0.24%) で，総量で全電力量の 3.36% にしか過ぎない。そこで地熱発電をはじめとする再生可能エネルギーの有効利用に力を入れるべきという国の方針が示されている（首相官邸，2010a, 2010b）。

期待が高まっている地熱発電であるが，このところ，新しい大きな地熱発電所の建設はない。地熱発電が進まない大きな原因の一つに既存温泉への影響の問題がある。温泉に関係する人々にとって，地熱発電が温泉に影響を与えることを心配して，反対の声が上がり，地熱発電が進まない事態が生じている。

2. エネルギーと環境の関係

エネルギーと環境の関係は，どちらも我々にとって重要なものであるが，基本的にトレードオフ（背反）の関係にある。地球環境問題はその典型であると言ってよい。産業革命以降，人類は豊かで便利な社会を求めて産業を進展させ，その駆動力として化石燃料の燃焼による熱エネルギーを爆発的に使用してきた，その結果は大気中の二酸化炭素濃度をそれまでの 2 倍近くにまで増加させ，今日のそしてこれからもっと顕著になる可能性のある地球環境問題を生起させたのである。これほどのハイペースでの豊かさの追求は必要でなかったのかもしれない。スローライフでゆったり暮らす道があったのかもしれない。しかし，我々はすでに便利すぎる生活を日常化してしまっている。

環境の貴重さに我々が目覚めたのは，そんなに昔のことではない。我が国でも戦後に環境庁・環境省がつくられ，様々な環境面の施策が実行されてきた。国立公園も増え，生態系の保全を目的とする国際条約（生物多様性条約）を日本は進んで批准した。最近でも，生物多様性の尊重のほか，世界遺産の指定の中でも自然環境は重視されてきている。このように世の中は 20 世紀に，環境の大事さを共通認識としてだれもが疑わない時代とした。ところが，地球環境問題と合わせてオイルピークというエネルギー危機の足音を耳にして，一時は原子力がそれに代わり得ると考えた我々であったが，今回の福島原発の事故は原発の安全神話も打ち砕くことになった。

幾らかはいわゆる省エネにより，我々は耐えることができるであろう。しかし，環境，エネルギーと並んで経済の維持も危機に瀕する中では，産業や生活の基盤であるエネルギーも何とか維持しなければならぬ事態に陥ったのである。この事態に立ち向かうには，原発への依存体質を変え，自然エネルギーを総動員で対応することが求められているのである。特に日本では，豊富な資源である地下からの熱，地熱資源もその一員として役割を果たさなければならなくなっている。

基本的にエネルギーとトレードオフの関係にある環境は，これまでとは異なり，太陽光，風力，地熱といった自然エネルギーとどう折り合いをつけるかの新しい局面に立たされている。21 世紀は，錦の御旗として環境であればその大切さが罷り通った時代ではなくなっている。エネルギーが環境を冒さないような不断の努力をすることはもちろんであるが，聖域である環境部分とそれほどでもない環境部分のランクを明確化し，惰性で構築してきた意味の薄い環境部分については見直しを図り，エネルギーとの折り合いをつけなければならない時代になっているのである。この環境とエネルギーの折り合いは，現時点での合意だけではなく，将来も見越した合意であることが必要である。そのとき，それぞれの利害関係者だけでなく，国民全体から見たときに納得できる形が要求される。

3. 温泉に影響しない地熱発電を行うには

ここでは、特に関心の大きい温泉との関係について、どのような状況にあるか、どう考えたらよいかを述べることにする。著者の結論はこうである。地熱発電が絶対に温泉に影響しないと言うことはできない。地熱発電のための地熱流体を地下から採り過ぎると、両者のつながり方と地熱流体のでき方次第では、温泉に影響を与えることがある。一方、どんな場合でも採り方をコントロールすることにより、温泉への影響を生じないようにすることができる。

海外では地熱発電が温泉に影響した例が幾つか知られており、学術論文で紹介されその関係が示されている。一方、日本では、影響したという声は聞くが、調べてみるとそのことを示すデータは見当たらず、影響を示すことが科学的に記述された論文はない。海外での影響事例と日本を比べると、日本では、発電に用いる蒸気から分離した熱水を地下に戻している効果が大きいのと、後で述べるように、影響を与えない適正規模の発電を行うための考察（モデリングとシミュレーション）と開発後の状況監視（モニタリング）が行われているからだと考えられる。

モデリング

地熱発電と温泉の関係を理解しようとするときに、まず大事なものは、地熱流体と温泉がどのようにしてできているのかと、両者がどのようなつながりにあるかをきちんと理解すること（モデリング）である。地熱貯留層も温泉帯水層もしばしば、火山の周りに一緒に存在する。そこに含まれる地熱流体も温泉水も、その起源は雨水が地下に浸透して火山（マグマ）の熱により暖められたものである。地熱流体も温泉水も地表に流出したものは、やがて海に運ばれ、それがまた雲となり雨になって降ってくるという循環を繰り返している。したがって、無理をしない採り方をすれば、永遠に続くという持続可能な資源の特徴を持っている。

このように地熱と温泉は同じ仲間なのであるが、しばしば発電を行う使い方のときを地熱と呼んで区別している。地熱流体の存在する地熱貯留層は温度が高く、温泉帯水層よりは深い所にあるのが一般的である。地熱貯留層が温泉帯水層より高温なのは理由がある。熱源であるマグマに近いということの他に、地表からの冷たい水が直接侵入するのを防ぐ水を通しにくいキャップロック（帽岩）の存在が重要である。これに比べ、温泉帯水層はキャップロックの発達が不十分で、その分、温度は低くなる。

地熱貯留層と温泉帯水層はさまざまなつながり方をしていて、整理して考えると、両者には、温泉から見ると図 1 に示す 5 つのつながり方がある。左から、温泉が地熱貯留層からそのまま温泉水を採っているもの（同一熱水型）、地熱貯留層と温泉帯水層の間に仕切り（キャップロック）があるが、不十分なため幾らか熱水が供給され、それが希釈されて温泉になっているもの（熱水滲出型）、仕切りのわずかな隙間から、地熱流体から分離した水蒸気が地下水に混ざり込んで温泉化したもの（蒸気加熱型）、仕切りが発達しているため物質の移動はなく、熱が伝導的に伝えられて地下水が温泉化したもの（伝導型）、両者はまったく無関係なもの（独立型）、の 5 つの型である。どの型に当たるかは、両者の温度や水位のほか、温泉の化学成分（水質）の特徴によって判断することができる。分類上はこうであるが、本当に関係し合う地熱貯留層と温泉帯水層の関係にあるかは、地理的關係など実際の例に当たって確認しなければならない。

シミュレーション

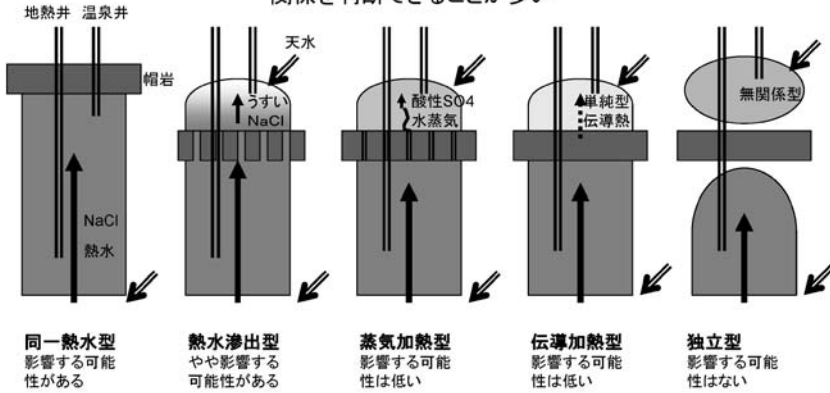
さて、熱水型や熱水希釈型だと即影響があると即断しないでいただきたい。もう 1 つ考えなければならない要素は、地下からの熱水の供給に対し、それに見合った採取が行われているかというバ

ランスの確認である。

熱水型や熱水希釈型の温泉は一般に、上昇流域という地下からの熱い流体が豊富に上昇してくる地域に見られる。その上昇してくる地熱流体を減らさないで、一定を保つ発電ができるのであれば、図2に示すように、温泉が地熱貯留層からの熱水につながっていても、温泉は影響を受けないことになる。

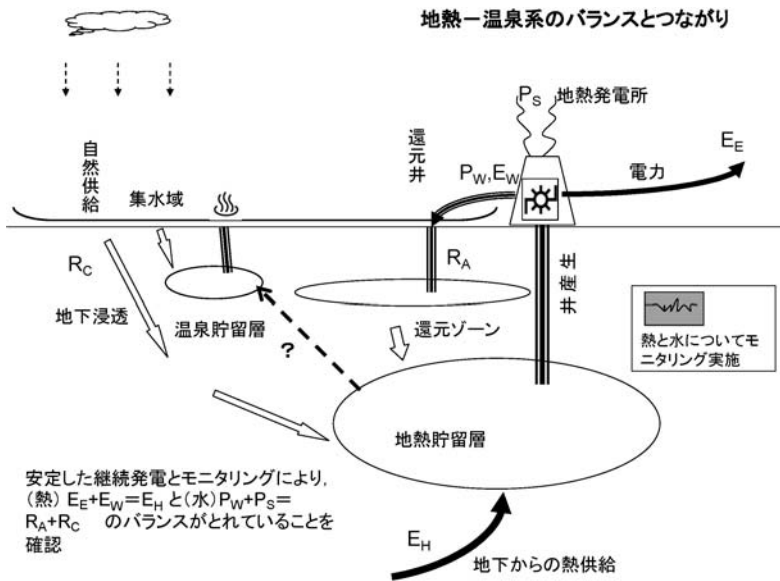
地熱貯留層と温泉帯水層と帽岩の関係

両者の温度、水位、泉質、位置(深度、水平距離)で関係を判断できることが多い



熱水の取り過ぎにより熱水貯留層の圧力が低下する場合に影響が生じる。熱水貯留層の収支バランスがとれていれば影響は生じない。また、温泉相互の関係と、他の人為的、自然的影響があり得るので判断には注意を要する。

図 1 地熱貯留層と温泉帯水層の様々なつながり方 (日本地熱学会, 2010)



安定した継続発電とモニタリングにより、
(熱) $E_E + E_W = E_H$ と (水) $P_W + P_S = R_A + R_C$ のバランスがとれていることを確認

図 2 地熱—温泉系のバランスとつながり (日本地熱学会, 2010)

この地熱資源と温泉資源の関係を分かりやすく例えたのが図3である。温泉旅館の浴槽に浮かぶ木製の洗い桶を思い浮かべてみよう。洗い桶は古く、底板が反ってお湯が中に入って来る。この中のお湯を汲み合っているのが温泉である。これに対し、浴槽の中のお湯を汲み上げているのが地熱である。浴槽のお湯が減らないような汲み上げ方をするかぎり、洗い桶の中に入るお湯の量は影響を受けない。浴槽のお湯が減るかどうかは汲み上げる量が、湯元から浴槽に入ってくるお湯の量とバランスするかどうかによる。バランスしているかどうかは、浴槽の水位が一定に保たれているかどうかによって判断できる。

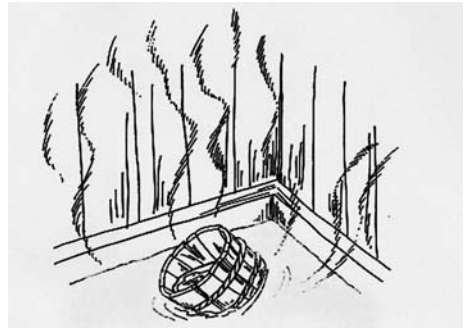


図 3 浴槽に浮かぶ木製の洗い桶 (野田, 1993)

このことは、地熱発電を行う前に、地下の水の流動を再現するシミュレーションにより予測することができる。地下を再現するモデルを取り扱う流動計算技術とコンピュータの計算能力の飛躍的な発達により、実際に発電を行わないで、温泉を含む地熱系がどのように変化するかを予測することが可能になってきた。具体的には、地層をブロックに切ったモデルに水の通りやすさや水の入ってくる所、出ていく所、熱源からの熱の伝わり方、温泉の現状や地下の温度の状態などを再現することから始める。その再現の後で、想定する出力の発電を行ったとして地熱流体の量や性質、温泉の量や温度などがどう変わっていくかを見る。変化を見る期間は30年でも100年でも自在である。変化が見られなければ、その出力での発電を安心して行うことができるが、もし好ましくない変化が起こるようであれば、出力を下げ再計算して最適値を見つけたり、最悪の場合は発電計画を中止したりする。一方、まだ余力があるようであれば、出力を増やすことも可能である。

モニタリング

また、万一のことがあるといけないので、このモデリングとシミュレーションに加えて、実際の変化がないことを、地下からの地熱流体の採取状態のほか、周辺の温泉の状態も監視するモニタリングを行う。温泉法精神である、温泉資源の保護と適正な利用は地熱発電を温泉との関係にも当てはまる。環境省からは、「温泉資源の保護に関するガイドライン」(環境省自然環境局, 2009)が示された。そこには、重要なポイントとして、温泉保護のためにはモニタリングが大事であることが述べられている。地熱発電を行うときには、この考え方が採り入れられている。

温泉を保護するために大事なこと

温泉を保護するには地熱発電による採取だけをモニタリングすればよいのではない。温泉自身のモニタリングも同時に大事である。ここでは、地熱発電の温泉への影響について主に述べたが、実際に温泉への影響をもたらしているのは温泉同士であることが広く知られている。ほかにも温泉に影響を与える要因はたくさんある。自分の健康を維持するには、自分自身が健康診断を受け健康維持に努めなければならない。どんな病気にかかっているか(何が影響を与えているか)を知るためにもモニタリングは必要である。温泉同士の影響を無くすには、つながりのある温泉が全体として、温泉を持続するために、採り過ぎない(具体的には温泉の水位を下げないように)ように、協力して自己管理することが大切である。

温泉地では、地熱発電のときほど精密なシミュレーションは必要ないであろう。しかし、モデリ

ング（温泉がどうやってできているか、相互のつながりはどうなっているか）と、簡単なシミュレーション（どれくらいの採取量が適当かを知るタンクモデルなどによる解析）は必要である。

4. 地熱発電と温泉との共生

地熱発電と温泉とが共生するという事は、影響がないことに留まらない。つまり両者にメリットがあるべきだと考える。このウィン-ウィンの関係があり得るかを、東京都伊豆諸島の八丈島の例（日本地熱学会、2010）で紹介する。八丈島には、地熱発電所の建設に入る平成4年以前に9つの温泉があった。温泉の多くは海岸にあり、塩分が濃いこともあって、管の痛みや目詰まりの発生が頻繁で、量が減ったり温度が低下したりするトラブルに悩まされていた。そんな中、優れた地熱資源があることが分かり、地熱発電の計画が持ち上がった。八丈島の温泉帯水層と地熱貯留層の関係は、図1に照らすと影響の心配の全く無い独立型に最も近い。地熱発電所建設の早い段階から、地熱の開発事業者は地元はこの関係を十分説明し、地域に理解してもらうことから取りかかった。地熱の開発事業者は地熱の専門家であると同時に、温泉のことも良く知っている。そこで、彼らは、地元への貢献として温泉関係の色々な相談に乗り、安定した温泉を得るにはどうしたらよいか、8つの温泉について、代替掘削位置の選定や、温泉井の仕上げ方などのアドバイスを行い、安定した温泉の状態を実現した。これにより主な温泉の利用者数は、ここ十年で約2.5倍に増加し、温泉が八丈島の有力な観光資源となり地元より感謝されている。また、地熱発電の副産物である豊富な余剰熱を2つの大規模な温室団地に供給し、温室の維持など地域産業への振興にも寄与している。さらに、地熱発電所には地熱館（PR館）を併設し、地熱発電の仕組みの紹介だけでなく、八丈島誕生の様子のコンピュータグラフィックスの映写、シアターの提供なども行っており、無料開放して、定期観光バスのルートにもなっている。

これは、共生の好例であるが、他にも色々な地熱発電による地域への貢献の形態がある。これらを活用した理想的な共生システムの姿を図4に示した。

5. 地熱と温泉の具体的な共生検討の場

平成22年6月15日に閣議決定された「規制・制度改革に係る対処方針」（内閣府、2010）では、「再生可能エネルギーの導入促進に向けた規制の見直し（自然公園・温泉地域等における風力・地熱発電の設置許可の早期化・柔軟化等）」が規制改革事項とされ、その対処方針の1つとして、地熱発電の開発のための温泉の掘削等に関し、「温泉法における掘削許可の判断基準の考え方を策定し、ガイドラインとして運用するよう通知する。（平成22年度中検討開始、結論を得次第措置）」こととされた。さらに同年9月10日に閣議決定された「新成長戦略に向けた3段階の経済対策」（首相官邸、2010b）が決定され、前述の規制改革事項について通知時期が「平成23年度中を目途に通知する。」と明示されている。これを受けて環境省では、温泉資源の保護を図りながら再生可能エネルギーの導入促進が図られるよう、地熱発電の開発のための温泉の掘削等を対象とした温泉資源の保護に関するガイドライン策定の検討に着手している。

その中で著者は、下記の内容から成る「地下熱エネルギー利用協議会」の設置を提案している。これは、地熱資源と温泉資源などの有効な利用を図り、相互の影響をなくすよう関係者が協働する場の設定をねらったものである。

1) 地域に地下熱エネルギー利用協議会（以下協議会）を構成し、地熱資源、温泉資源などの地下熱エネルギーの有効な利用を図るとともに相互の影響をなくすための協議を行う。

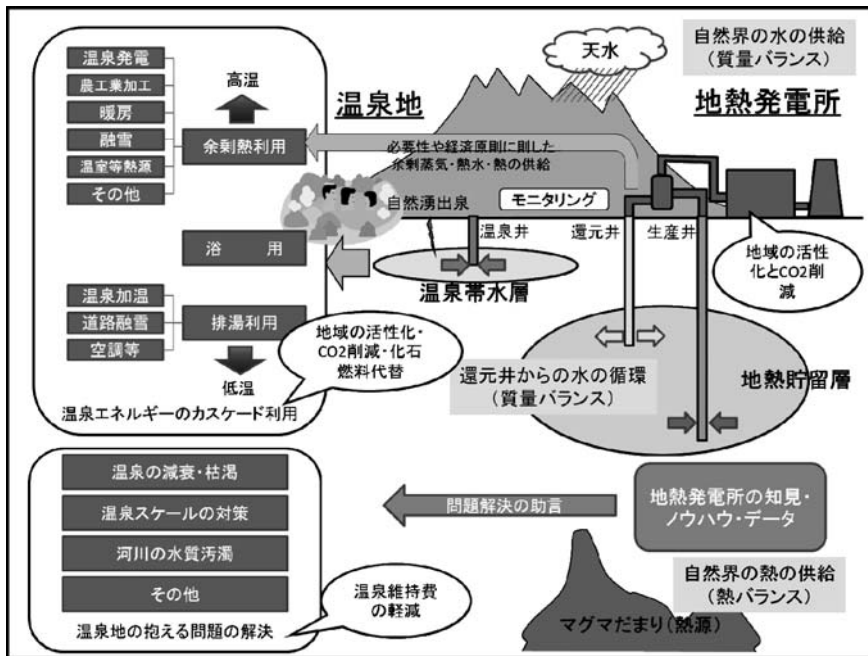


図 4 地熱発電と温泉との共生の姿 (日本地熱学会, 2010)

2) 地下熱エネルギー利用協議会は当該自治体, 地熱発電企業, (温泉関係者を含む) 地域代表, 学識経験者から構成する。

3) 地熱発電企業は, 地熱貯留層と温泉帯水層の関係を概念的に示すモデル (概念モデル) や, 温泉帯水層への影響の出ない採取量 (適正採取量) を示す数値モデルを基本とする資料を提示する。温泉関係者は, 「温泉保護に関するガイドライン」(環境省自然環境局, 2009) に示された, 各温泉のモニタリングデータなどの温泉に関するデータを提供する。

4) 協議会では, モニタリングの実施法の決定のほか, 地域の地熱資源, 温泉資源などの地下熱エネルギーの有効な利用を図るとともに, 相互の影響をなくすためどのようにしていくかなどについて様々な協議を行う。

6. おわりに

温泉も地熱もともに地下の熱資源であり, 地域の大事な資源である。資源を生かすも殺すも地域の皆さんがどう考えるかにかかっている。温泉に影響するような形の地熱発電の導入はとんでもないことである。一方で, 地熱発電は温泉に影響するものと決めてかかるのも得策ではない。温泉に影響しないような地熱発電は可能であるだけでなく, 地域振興のチャンスにもなり得るからである。地域がこれからどう発展していくか, 地球環境問題やエネルギー危機も考慮に入れて, 子孫のために賢い選択をしていかなければならない。

謝 辞

査読者からいただいた御指摘は, 内容を改善するのに大いに役立ったことを記して深く感謝し, 本稿を終える。

引用文献

地熱発電に関する研究会（2009）：地熱発電に関する研究会 中間報告. 41 p.

環境省自然環境局（2009）：温泉資源の保護に関するガイドライン. 57 p.

内閣府（2010）閣議決定「規制・制度改革に対する対処方針」.

<http://www.cao.go.jp/sasshin/kisei-seido/publication/230909/item230909-2.pdf>

日本地熱学会（2010）：報告書 地熱発電と温泉利用との共生を目指して. 62 p.

野田徹郎（1993）：地熱発電と温泉との共存. 地熱発電シンポジウム報告『地熱開発と地域との共生』. 42-64. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 新エネルギー財団. 東京.

自然エネルギープラットフォーム（2011）：第3章 これまでのトレンドと現況. 自然エネルギー白書 2011. 52-69.

首相官邸（2010a）：閣議決定「新成長戦略」について.

<http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichousenryaku/sinseichou01.pdf>

首相官邸（2010b）：閣議決定「新成長戦略実現に向けた3段階の経済対策」について.

<http://www.kantei.go.jp/jp/keizaitaisaku2010/keizaitaisaku.pdf>