

省入熱サブマージアーク溶接技術

Multiple Electrode Submerged Arc Welding Process with Low-Heat Input

上月 渉平 KOZUKI Shohei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部
早川 直哉 HAYAKAWA Naoya JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)
大井 健次 OI Kenji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士 (工学)

要旨

天然ガス輸送用パイプライン用 UOE (U-ing O-ing expansion) 鋼管への要求性能厳格化を受け、溶接部の熱影響部 (HAZ) 靱性に優れた次世代溶接技術である細径ワイヤシーム SAW (Submerged arc welding) 技術を開発した。細径ワイヤシーム SAW 技術は UOE 鋼管のシーム溶接における HAZ 靱性の向上を目的に、多電極サブマージアーク溶接の先行電極に細径ワイヤを適用することで溶接入熱を低減する技術である。ワイヤを細径化することで溶着速度と溶込み深さが増加し、溶接入熱を低減させて HAZ 靱性の向上を図った。本技術を適用した API (American Petroleum Institute) 規格の X65 クラス高強度厚肉 UOE 鋼管において、Fusion line 近傍のオーステナイト結晶粒径が微細化され、優れた HAZ 靱性を有することを確認した。

Abstract:

In recent years, mechanical properties of weld joint for natural gas transportation U-ing O-ing expansion (UOE) pipes have been more stringent. JFE Steel developed a new submerged arc welding (SAW) process for high-strength and heavy wall thickness UOE pipes. A new SAW process which can reduce heat input of 25% due to its high deposition rate and deep penetration is performed with multiple electrode SAW using small diameter welding wire on lead electrode. Improvement of heat affected zone (HAZ) toughness in seam welding on API X65 (API : American Petroleum Institute) heavy wall linepipe and refinement of prior austenite grain size in HAZ was achieved in order to reduce its heat input.

1. はじめに

世界規模での環境問題への高まりやエネルギー需要の拡大から、天然ガスへの需要が大幅に増加している。有数の天然ガス産出地であるロシアや北ヨーロッパでは、ガス田から消費地までを結ぶ数千キロメートルにも及ぶ長距離パイプラインがこれまでも数多く敷設されているが、さらなる需要の高まりを背景にロシアと欧州とを結ぶ South Stream プロジェクトや Nord Stream プロジェクトをはじめとした大型パイプラインプロジェクトが国家主導で次々と計画されており、安全かつ高効率で天然ガスを輸送するためのインフラ整備が活発に進められている。これらの背景を受け、パイプラインに使用される鋼管 (ラインパイプ) に対する要求性能は厳しさを増しており、特に近年の需要増加に伴う操業圧力の高圧化^{1,2)} や深海敷設時の水圧による耐圧潰性の確保³⁾、高速延性破壊防止⁴⁾ などの観点から、ラインパイプに使用される鋼板の高強度化・高靱化・厚肉化が図られている。他方で、ラインパイプ敷設時の円周溶接部や造管時に形成される溶接部に対する要求性能も例外ではなく、特

にシーム溶接部においては高塩基性フラックスの適用による溶接金属高靱化や鋼板組成適正化による HAZ (Heat affected zone) 靱性向上などが図られている^{5,6)}。

ラインパイプ用途に広く適用されている UOE (U-ing O-ing expansion) 鋼管においては、厚板をパイプ状にプレス整形して製造するその特徴から、板の突合せ部にシーム溶接部が存在する。シーム溶接部は生産性確保の観点から内外面 1 層の多電極の DSAW (Double submerged arc welding) によって溶接されるが、近年のパイプラインの厚肉化に伴いシーム溶接部への溶接入熱は増加傾向 (図 1) にあり、溶接ままだも高い HAZ 靱性を得ることが課題である。

HAZ 靱性の改善手法は基地となる組織がフェライト主体の場合とベイナイト主体の場合とで若干異なるものの、概ね (1) オーステナイト粒径の微細化による破面単位の微細化 (2) 硬質相である M-A (Martensite-austenite constituent: 島状マルテンサイト) 分率の低減 (3) 母材の高純度化 (N や P の低減) などが有効であり⁷⁾、溶接プロセスの観点では上記 (1) の視点で溶接部の入熱を抑制することが HAZ 靱性を向上させる有効な手段のひとつとなる。

2014 年 1 月 17 日受付

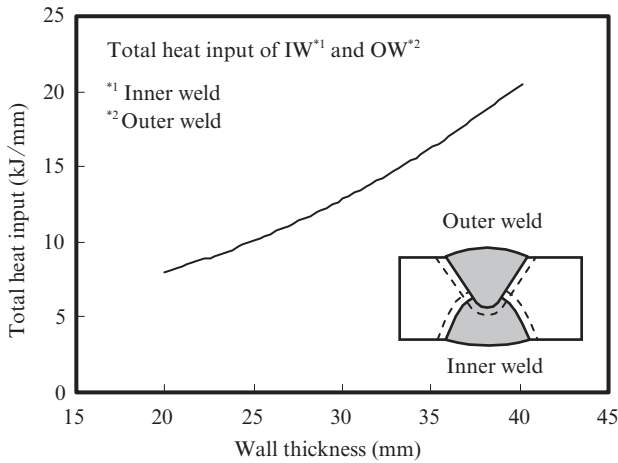


図1 UOE鋼管の板厚とシーム溶接部の溶接入熱の関係

Fig. 1 Relationship between wall thickness and heat input on seam welded joint on UOE linepipe

2. 省入熱 SAW 溶接技術の概要

UOE鋼管シーム溶接部のHAZ韌性は、溶接入熱の低減とともに向上する³⁾。図2にFusion line近傍の旧オーステナイト粒径と溶接入熱の関係を示す。HAZ韌性を支配する因子のひとつであるオーステナイト粒径は溶接入熱の低減とともに減少し、HAZ韌性が向上する。溶接入熱を低減する有効な手段のひとつとして、多電極サブマージアーク溶接の先行極に細径ワイヤを適用した省入熱SAW技術の適用がある^{3,8)}。この技術は先行極を細径ワイヤにすることで(1)溶着金属量の増加、(2)溶込み深さの増加ならびに(3)溶接金属先端形状の先鋭化の3つの効果を活用し、溶接入熱を低減しながらHAZ韌性を向上できる技術である。

2.1 細径ワイヤの適用による溶着速度増加

図3に1電極SAWにおける単位時間当たりの溶着量に及ぼすワイヤ径の影響を示す。2.4 mm、4.0 mmのいずれも溶接電流の増加とともに溶着速度が指数関数的に増加する。溶着速度は一般的に平田らが提案した(1)式の関係に従う⁹⁾。

$$V_m = \frac{1}{\rho H_0} (\phi J + R_0 Ex J^2) \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、 ρ : ワイヤ密度 (kg/m³)
- H_0 : 溶滴の保有熱量 (J/kg)
- ϕ : 電極加熱の等価電圧 (V)
- $\phi = V_A + V_{WA} + V_r$
- V_A : 陽極降下電圧 (V)
- V_{WA} : 陽極物質の仕事関数 (V)
- V_r : アークプラズマ中の電子のエンタルピーの等価電圧
- J : ワイヤ突出し部の電流密度 (A/m²)
- $J = I / (\pi d^2 / 4)$

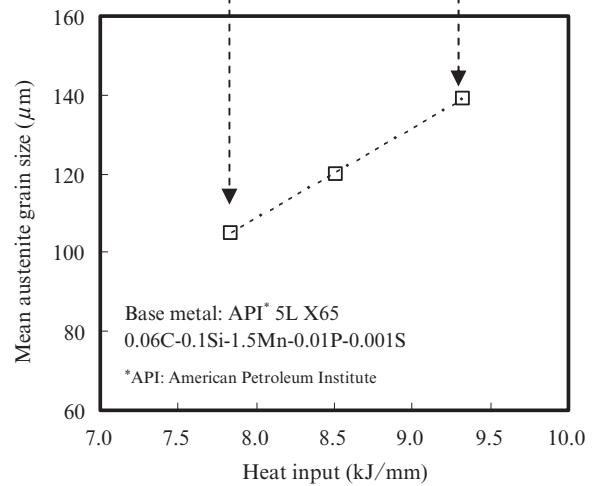
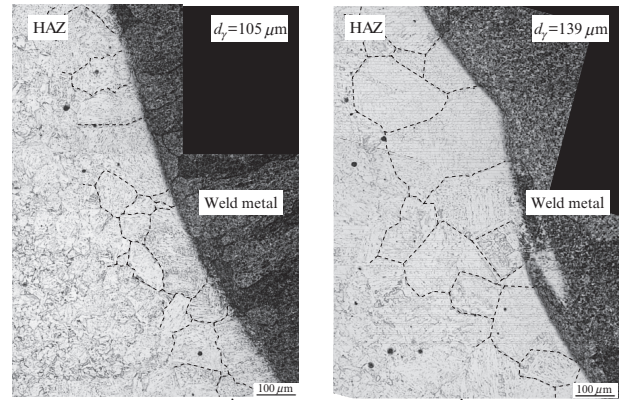


図2 熱影響部 (HAZ) のオーステナイト粒径に及ぼす溶接入熱の影響

Fig. 2 Effect of heat input of double submerged arc welding (DSA) on austenite grain size

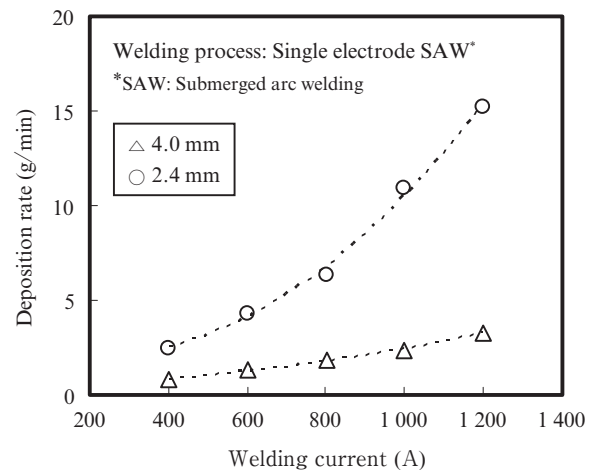


図3 溶着速度に及ぼすワイヤ径の影響

Fig. 3 Effect of welding wire diameter on deposition rate

- I : ワイヤ突出し部の電流 (A)
- d : ワイヤ直径 (m)
- R_0 : 抵抗率 (Ω・m)
- Ex : ワイヤ突出し長さ (m)

すなわち、溶着速度は電流の2乗に比例して増加し、ワイヤ径の2乗に反比例して増加するため、ワイヤの細径化によりワイヤの断面積を減じれば、同一の電流でも飛躍的に溶着量を増加させることができる。

2.2 細径ワイヤの適用による溶込み深さ増加

図4に溶込み深さに及ぼすワイヤ径の影響を示す。溶接法は1電極SAWである。ワイヤの細径化により溶込み深さが顕著に増加する。これは、ワイヤの細径化に伴って電流密度が増加し、アークエネルギーの密度を高めるとともに、電磁ピンチ力の増加によりアークが細く絞られた結果、溶込み深さが増加するためである。溶接入熱を低減させるための要件は、融合不良や溶込み不足、アンダーカットなどの溶接欠陥を生じさせずに、継手として最低限必要な溶込み深さと溶着量を確保しながら溶接を行なうことであるため、ワイヤの細径化によって溶着量と溶込み深さが増加する分だけ溶接速度を高速化して溶接入熱の低減が可能である。

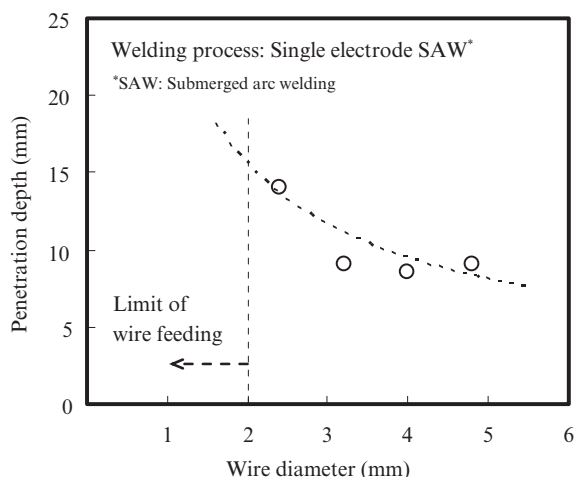


図4 溶込み深さに及ぼすワイヤ径の影響

Fig. 4 Effect of wire diameter on penetration depth

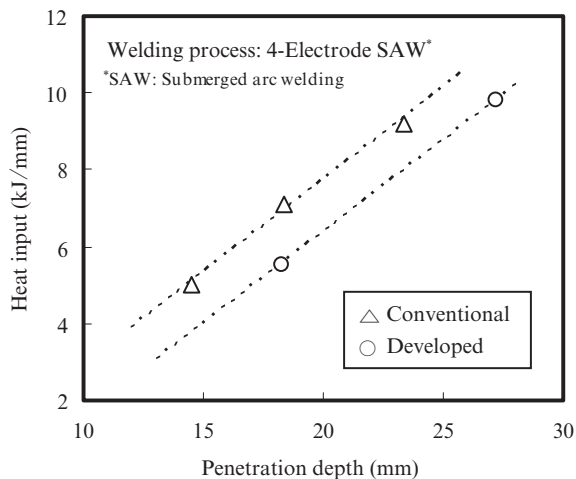


図5 4電極SAWへの細径ワイヤ適用による入熱低減効果

Fig. 5 Heat input reduction effect on 4-electrode SAW

図5に4電極SAWの先行極に細径ワイヤ（直径2.4mm）を適用した場合の入熱低減効果を示す。従来法と比較すると、最大で約25%の溶接入熱低減が可能である。

3. 細径ワイヤシームSAW技術の有効性

3.1 実験方法

UOE鋼管のシーム溶接部に細径ワイヤシームSAW技術を適用して各種機械性能評価を行なった。実験では表1に示す成分のAPI (American Petroleum Institute: 米国石油協会) に規定されたラインパイプ材であるX65 (降伏強度: 65 kpsi) クラスの高強度鋼板を用い、UOE鋼管の製造条件と同等の溶接条件でDSAWを実施した。板厚は29mmの鋼板を用いた。その主な溶接条件を表2に示す。溶接は外面開先底面にガスシールド溶接にて連続仮付を施したX開先の突合せ継手を使用し、内面溶接、外面溶接の順に溶接を行なった。溶接後、Fusion line近傍の母材HAZ組織観察のために、ビード断面をエメリー紙とアルミナ粉末で研磨後、ピクリン酸でエッチングを施してオーステナイト粒界を現出させた後、光学顕微鏡観察に供した。また、HAZ韌性評価

表1 母材の化学組成

Table 1 Chemical composition of base metal

(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Others
0.05	0.15	1.6	0.005	0.001	Ni, Cr, Mo, Nb, Ti

表2 4電極SAWの主な溶接条件

Table 2 Welding condition of 4-electrode submerged arc welding (SAW)

Process	Electrodes	Electrode diameter (mm)	Heat input (kJ/mm)	Travel speed (m/min)
Conventional	1st	4	7.2	1.3
	2nd	4		
	3rd	4		
	4th	4		
Developed	1st	2.4	5.5	1.6
	2nd	4		
	3rd	4		
	4th	4		

Specimen shall sample 50% weld metal and 50% HAZ

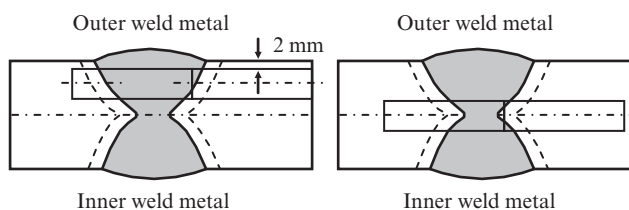


図6 シャルピー試験片採取位置

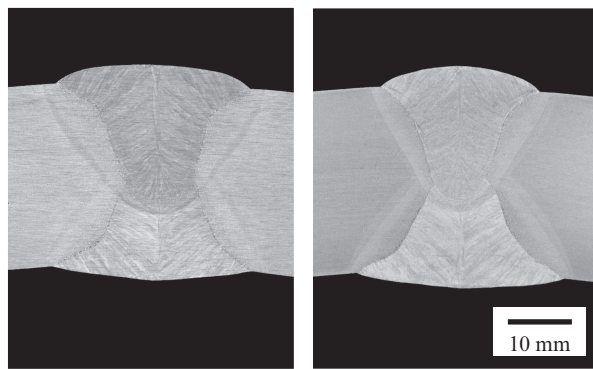
Fig. 6 Charpy V-notch impact test specimen positions

のために、**図 6** に示した位置から V ノッチシャルピー衝撃試験片 (JIS Z 2242) を採取し、それぞれの試験片を -30°C の試験温度でシャルピー試験に供し衝撃吸収エネルギー $vE_{-30^{\circ}\text{C}}$ を評価した。

3.2 実験結果および考察

写真 1 に溶接金属の断面マクロ写真を示す。外面溶接に細径ワイヤを適用することで従来法と同等の溶込み深さを確保しながら、従来比約 75% の溶接入熱でも溶込み不足や溶着量不足のない溶接継手が作製できることを確認した。なお、溶接後に実施した超音波探傷試験ならびに放射線透過試験において、溶接線全長にかけてスラグ巻き込みや溶込み不良などの溶接欠陥は発見されず、健全な継手の形成を確認した。

図 7 に外面溶接金属の HAZ シャルピー衝撃試験結果を示

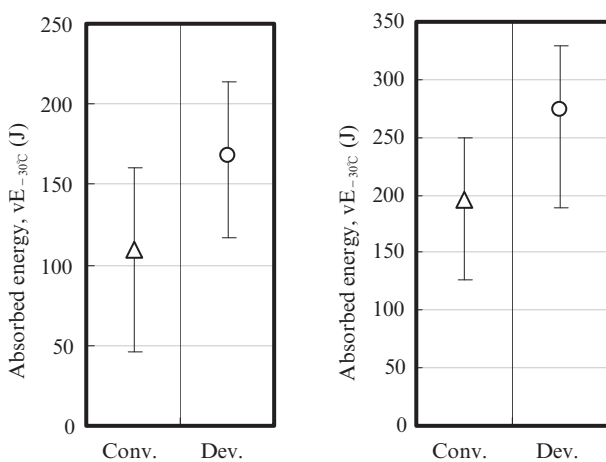


(a) Conventional SAW* (b) Developed SAW

*SAW: Submerged arc welding

写真 1 従来法ならびに開発法の継手断面マクロ写真

Photo 1 Macrostructure of conventional SAW and developed SAW

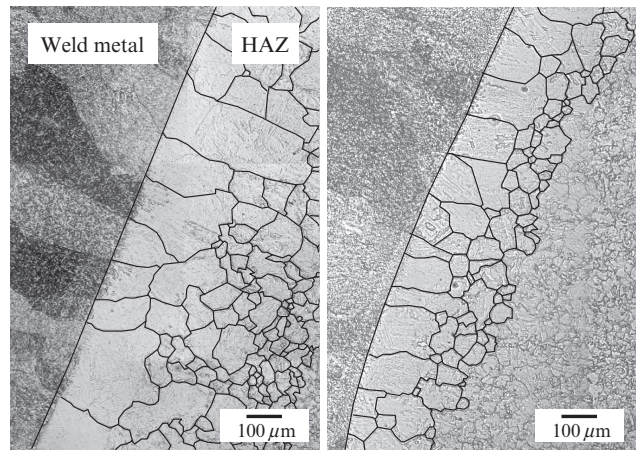


(a) Outer weld metal HAZ* (b) Root HAZ

*HAZ: Heat affected zone

図 7 従来法ならびに開発法のシャルピー衝撃試験結果

Fig. 7 Charpy impact test results of HAZ



(a) Conventional SAW* (b) Developed SAW

*SAW: Submerged arc welding

写真 2 外面溶接金属融合部近傍の HAZ 組織写真

Photo 2 Heat affected zone (HAZ) micrograph of conventional SAW and developed SAW

す。プロット値は -30°C における衝撃吸収エネルギー $vE_{-30^{\circ}\text{C}}$ の平均値である。細径ワイヤシーム SAW 技術の適用により、外面溶接金属の HAZ 靱性ならびに、内外面溶接金属会合部の HAZ 靱性の向上が確認された。

写真 2 に外面溶接金属の HAZ ミクロ組織観察結果を示す。観察はシャルピー衝撃試験片でノッチ底となる位置に対応している。ピクリン酸によりエッチングされたオーステナイトの平均結晶粒径を線分法にて測定したところ、細径ワイヤシーム溶接技術の適用によりオーステナイト平均結晶粒径が約 $140\ \mu\text{m}$ から約 $80\ \mu\text{m}$ に微細化しており、この事がシャルピー衝撃試験で破面単位を減少させ、外面溶接部の HAZ 靱性が向上した主な要因であると考えられる。また、内外面溶接金属会合部の HAZ 靱性においても同様に、外面溶接入熱の低減により会合部におけるオーステナイト粒の粗大化が抑制され、靱性が改善したものと考えられる。

他方で、内面溶接によって熱影響を受けた部位に外面溶接による熱影響が加わる多重熱サイクル領域では、一般的に靱性劣化を招く M-A (Martensite-austenite constituent) の生成が懸念される ICCGHAZ (Intercritically coarse grain heat affected zone) と呼ばれる LBZ (Local brittle zone: 局所脆化域) が存在しており、入熱低減による LBZ の縮小も会合部 HAZ 靱性向上に寄与しているものと推測される。

なお、溶接金属の機械的特性や継手特性も別途評価し、従来と同等の性能を発揮することを確認している。

4. まとめ

API X65 クラスの高強度厚肉 UOE 鋼管のシーム溶接部の HAZ 靱性向上を目的として、4 電極 SAW の先行極に細径ワイヤを使用した細径ワイヤシーム SAW 技術を適用した結果、

以下の知見を得た。

- (1) 4電極 SAW の先行極に細径ワイヤ（直径 2.4 mm）を適用することで、従来法と同等の溶込み深さを確保しながら、溶接入熱を約 25%削減した。
- (2) 溶接入熱の低減により、外面溶接金属 Fusion line 近傍のオーステナイト結晶粒径が約 4 割微細化し、HAZ 韌性が向上した。

5. おわりに

地球規模での環境問題への高まりから天然ガスの需要が年々増加している¹⁰⁾。単位熱量あたりの CO₂ 排出量は石炭：原油：天然ガス比で 100：80：50 とわれ¹¹⁾、2035 年における世界の天然ガス需要は 2009 年の 1.6 倍にも達するという試算もあり¹²⁾、高強度・厚肉ラインパイプに対する要求は今後も継続的に高まることが予想される。

高強度化のトレンドはエネルギー輸送分野に限らず、建築、造船、海洋構造物分野などでも著しく、今後のさらなる高強度化に対応するべく、本報で述べた低入熱溶接法の活用はもちろん、ファイバーレーザ溶接などの高エネルギー密度ビーム溶接や摩擦攪拌接合など新しい溶接技術を活用し、より高度な技術を活かしてお客様のご要望に応えられるよう注力していきたい。

参考文献

- 1) BP Statistical Review of World Energy. 2013-06.
- 2) Gao, Peng. "Natural Gas Pipeline Network Construction in CNPC: Current Status and Trends." 2013-09-24-26.
- 3) 荒川武和, 西村公宏, 矢埜浩史, 鈴木信久. ラインパイプ用高性能 UOE 鋼管の開発. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 22-33.
- 4) 牧野寛之. "パイプラインにおける高速延性破壊の伝播停止評価法." 溶接学会誌. 2008, vol. 76, no. 2, p. 114-117.
- 5) 松山隼也, 川端文丸, 志賀千晃. "高塩基性フラックスによる UOE 鋼管の溶接高速化: 低硬度・高韌性サブマージアーク溶接金属の開発 (第 3 報)." 溶接学会全国大会講演概要. 1991, 第 48 集, p. 80-81.
- 6) 石川信行, 遠藤茂, 近藤丈. ラインパイプ用高性能 UOE 鋼管. JFE 技報. 2005, no. 9, p. 19-24.
- 7) 濱田昌彦. "溶接熱影響部の強度, 韌性の制御." 溶接学会誌. 2003, vol. 71, no. 7, p. 22-26.
- 8) Ishigami, A. et al. "Development of Heavy Wall High-Strength UOE Linepipe by Means of Microstructural Control in Base Metal and Seam Weld." Proc. OMAE. paper OMAE-2011-50312.
- 9) 平田好則. "溶接アークプロセスの物理 [III]." 溶接学会誌. 1995, vol. 63, no. 7, p. 484-488.
- 10) International Energy Agency. Natural Gas Information. 2012.
- 11) International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion. 2012.
- 12) 経済産業省 資源エネルギー庁. 石油・天然ガスをめぐる最近の動向. 2011.



上月 渉平



早川 直哉



大井 健次