技術開発戦略評価モデルの定式化

（財）地球環境産業技術研究機構

要素技術の技術開発投資を含むコスト効率的な技術開発戦略を提示するために、以下に示すような混合整数計画問題として定式化を提案した。なお、決定変数は、時点別、プラント種別のプラント新規設備導入量と発電電力量、および、要素技術別の追加投資額となっている（厳密には式中の離散変数も決定変数）。

＜評価関数＞

$$\sum_{t=0}^{T} d_t \left(\sum_i \left(PV_t \frac{V_{it}}{Eff_i} + \sum_{\tau=t-h_i+1}^{t} \rho_i \, PF_i \, F_{i\tau} \right) \right) + \sum_j dv_j \, I_j \rightarrow \min. \tag{1}$$

＜制約条件＞

$$\sum_i V_{it} \geq EG_t \quad (t = 1, 2, \cdots, T) \tag{2}$$

$$V_{it} \leq \eta_i \times \frac{8760}{1000} \times \sum_{\tau=t-h_i+1}^{t} F_{i\tau} \quad (i = 0, 1, \cdots, I), (t = 1, 2, \cdots, T) \tag{3}$$

$$F_{it} \leq M \; \delta_{it} \quad (i = 0, 1, \cdots, I), (t = 1, 2, \cdots, T) \tag{4}$$

$$\delta_{it} \sum_{\tau=1}^{t} \Delta_\tau + M(1 - \delta_{it}) \geq TMT_i + TC_i \quad (i = 0, 1, \cdots, I), (t = 1, 2, \cdots, T) \tag{5}$$

$$TMT_i = f_i(TD_0, TD_1, \cdots, TD_J) \tag{6}$$

$$TD_j = TD_{base\ j} - k_j \times I_j \quad (j = 0, 1, \cdots, J) \tag{7}$$

$$TD_j \geq TD_{min\ j} \quad (j = 0, 1, \cdots, J) \tag{8}$$

決定変数はいずれも 0 以上

ただし、i ：対策技術の種類を表現する添字（本モデルでは 5 種類）、j ：各種要素技術の技術開発過程の種類を表現する添字、d_t：時間割引係数（割引率は 5%/yrと想定）、dv_j ：要素技術jの追加的技術開発投資に対する時間割引係数（本モデルでは標準ケースにおける技術開発投資開始時点で割り引くこととし、割引率は 5%/yrと想定）、PV_t：t期の燃料費、V_{it}：i種技術のt期における発電電力量、ρ_i：i種技術の年経費率（ここではiに依らず 17%と想定）、PF_i：技術iの単位設備コスト（ここではiに依らず 2000$/kWと想定）、$F_{it}$：$t$期における$i$技術の新規設備導入量、$\eta_i$：技術$i$の年平均利用率（ここでは 90%と想定）、$Eff_i$：技術$i$の発電効率、$h_i$：技術$i$の耐用年数（ここでは$i$に依らず 15 期（=30 年）と想定）、$I_j$：要素技術$j$に対する追加的な投資額、$k_j$：単位追加投資当りの時間短縮率、$EG_t$：対象技術全体の利用量シナリオ（ここでは石炭燃料発電電力量シナリオ）、δ_{it}：0、1 の 2 値のみを取り得る整数変数、Mは大きな数（10^8等）、Δ_t：t-1 期とt期の間の年数、TMT_i：対策技術iが利用可能になるまでの時間（年）、TC_i：対策技術iが技術開発に成功し

てから、運用開始可能となるまでの時間（ここではiに依らず 3 年と想定）、TD_j：要素技術jの技術開発に要する時間（年）、$TD_{base\ j}$：要素技術jの標準的な技術開発時間（年）、$TD_{min\ j}$：要素技術jの開発に最低必要な開発時間（年）、$f_i(\boldsymbol{x})$：要素技術の技術開発に要する時間から対策技術iの開発時間を導出する関数（非連続関数、以下を参照）

対策技術の開発時間 TMT は次の規則を用いることによって導出できる。

(i) Exclusive-OR ノード

$$T = \frac{\sum_{n=1}^{N} P_{u_n} p_{v_n} \left(T_{u_n} + t_{v_n}\right)}{\sum_{n=1}^{N} P_{u_n} p_{v_n}} \tag{9}$$

(ii) Inclusive-OR ノード

$$\begin{aligned} T_s = & \sum_{j=1}^{n} \frac{P_{u_j} p_{v_j} \prod_{m=1}^{n(m \neq j)} \left(1 - P_{u_m} p_{v_m}\right)}{1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P_{u_i} p_{v_i}\right)} \left(T_{u_j} + t_{v_j}\right) \\ & + \sum_{k=2}^{n} \frac{\sum_{j=1}^{{}_nC_k} \left\{ \left(\prod_{r=1}^{k} P_{u_{jr}} p_{v_{jr}} \times \prod_{s=k+1}^{n} \left(1 - P_{u\, j_s} p_{v\, j_s}\right) \right) \min\left(T_{u\, j_1} + t_{v\, j_1}, \cdots, T_{u\, j_k} + t_{v\, j_k}\right) \right\}}{1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P_{u_i} p_{v_i}\right)} \end{aligned} \tag{10}$$

minの値を表す変数G_wを用いることで(10)式を整理するとInclusive-ORノードの期待実現時間T_sは(11)式として定式化される。ただし、これらの他に個々のG_wに対して後述する(15)～(17)で示す制約式が必要である。

$$T_s = \sum_{j=1}^{n} a_j (T_{u_j} + t_{v_j}) + \sum_{w=1}^{2^n - n - 1} g_w G_w \tag{11}$$

ただし、G_w：Inclusive-ORに伴って生じるminの値を表す変数、g_w：G_wにかかる係数

(11)式のa_jは(12)式により与えられる。また、k本のminの値を取るケースにおけるG_wの係数g_wを$g_w(k)$とすると、$g_w(k)$は(13)式によって与えられる。ただし、Inclusive-ORノードに入力するアーク数nによって、2^n-n-1 回のmin演算が必要になる。そして、$k\ (\leq n\ )$本のmin演算を取る場合、後述のように、k個の 0、1 整数変数が必要になるため、モデル規模の増大に注意が必要である。

$$a_j = \frac{P_{u_j} p_{v_j} \prod_{l=1}^{n(l \neq j)} \left(1 - P_{u_m} p_{v_m}\right)}{1 - \prod_{m=1}^{n} \left(1 - P_{u_m} p_{v_m}\right)} \tag{12}$$

$$g_w(k) = \frac{\prod_{c=1}^{k} P_{u_c} p_{v_c} \times \prod_{d=k+1}^{n} \left(1 - P_{u_d} p_{v_d}\right)}{1 - \prod_{e=1}^{n} \left(1 - P_{u_e} p_{v_e}\right)} \tag{13}$$

(iii) AND ノード

$$T = \max_{n} \left(T_{u_n} + t_{v_n}\right) \tag{14}$$

なお、以上の式中に表れる min、max 演算については、以下の定式化によって表現する。

1) $G = \min(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ の定式化

$$0 \le x_i - G \le M \times (1 - \delta_i) \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = 1 \quad (\delta_i \in \{0,1\}) \tag{16}$$

$$x_i \ge 0 \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{17}$$

ただし、Mは大きな数（10^8等）

2) $H = \max(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ の定式化

$$0 \le H - x_i \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{18}$$

$$x_i \ge 0 \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{19}$$