

Reliability Modeling

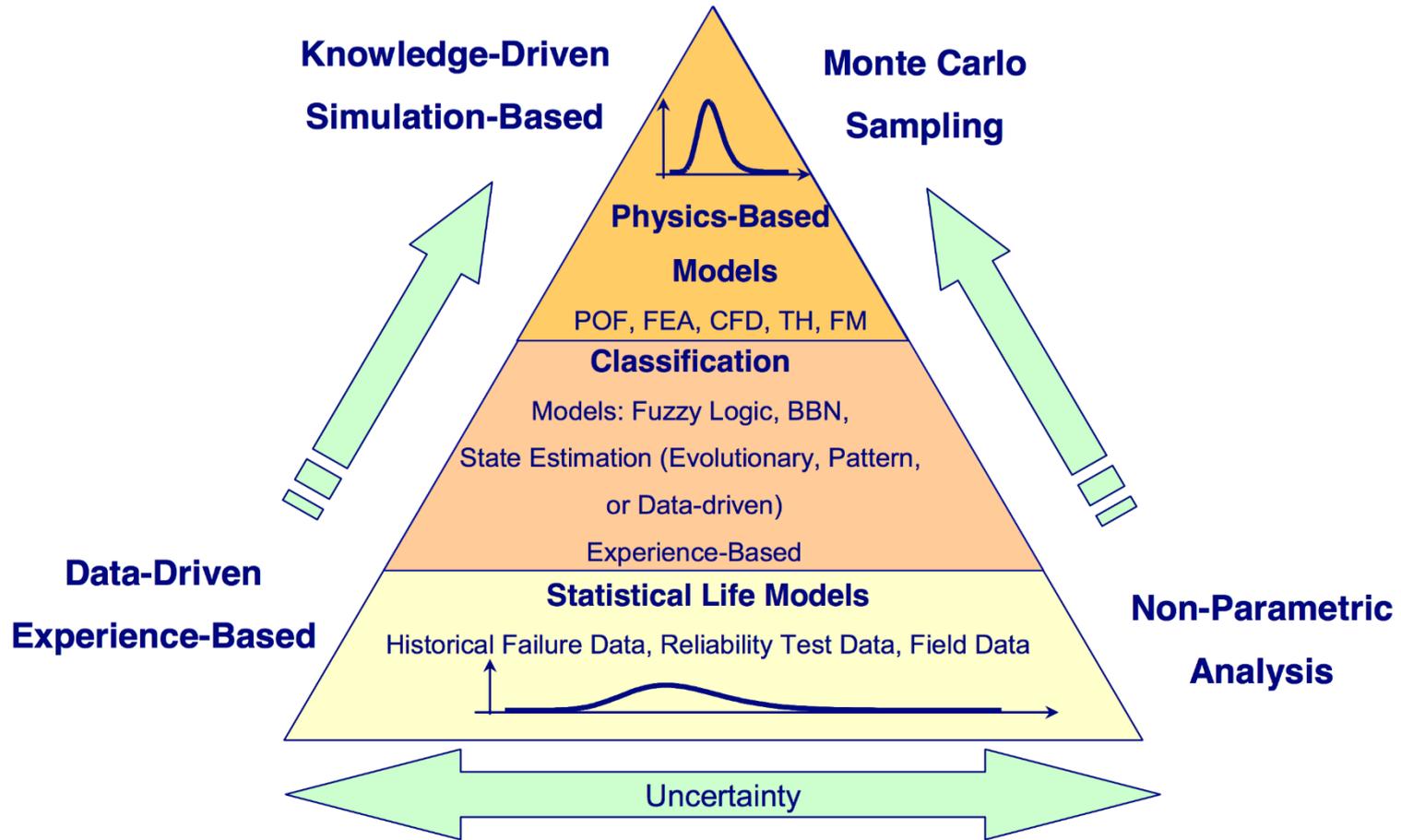
การจัดทำโมเดลความเชื่อถือได้

ดร.ชลกานต์ เอี่ยมสำอางค์

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ



พัฒนาการของการจัดทำโมเดล Reliability



โมเดลตามแบบฟิสิกส์ (Physics-Based Model)

Physics-Based Model (POF) เป็นการจัดทำโมเดลเพื่อการวิเคราะห์ reliability ตามแบบวิทยาศาสตร์ คือใช้โมเดลความเสียหายทางกายภาพที่เป็นไปตามกลไก ความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง เช่น ความล้า (fatigue), การแตก (fracture), การสึกหรอ (wear), การกัดกร่อน (corrosion)

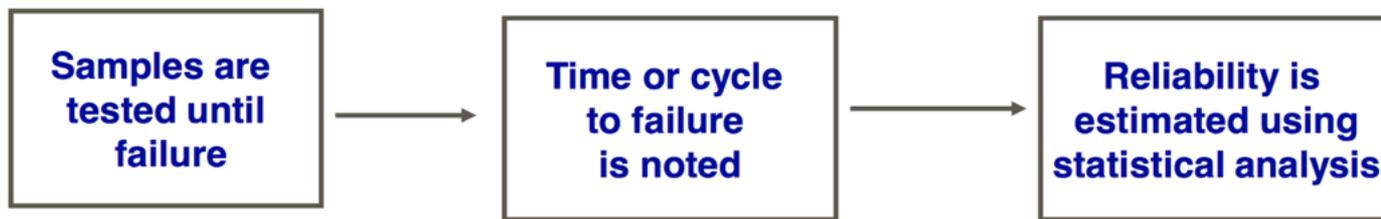
ข้อดี : ทำให้ขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลความเสียหายน้อยลง, ง่ายที่จะเชื่อมต่อกับโมเดลทางกายภาพอื่น, เน้นไปที่กลไกความเสียหายหลัก, สะท้อนตามประสบการณ์ความเสียหายจริง, สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น

ข้อเสีย : ต้องสำหรับผู้ที่มีประสบการณ์, ใช้เวลานานในการจัดทำโมเดล, เปลี่ยนแปลงจากการจัดทำแบบเดิมที่ทำอยู่มาก



การวิเคราะห์แบบเต็ม vs. แบบ PoF

ด้วยวิธีการทำการทดลอง (testing-based or empirical)



ด้วยวิธีคำนวณทางฟิสิกส์ (physics-base or computational)



ตัวการที่ทำให้เกิดความเสียหาย (agents of failure)

1. แรงกระทำ หรือ ความเค้น (Stress)

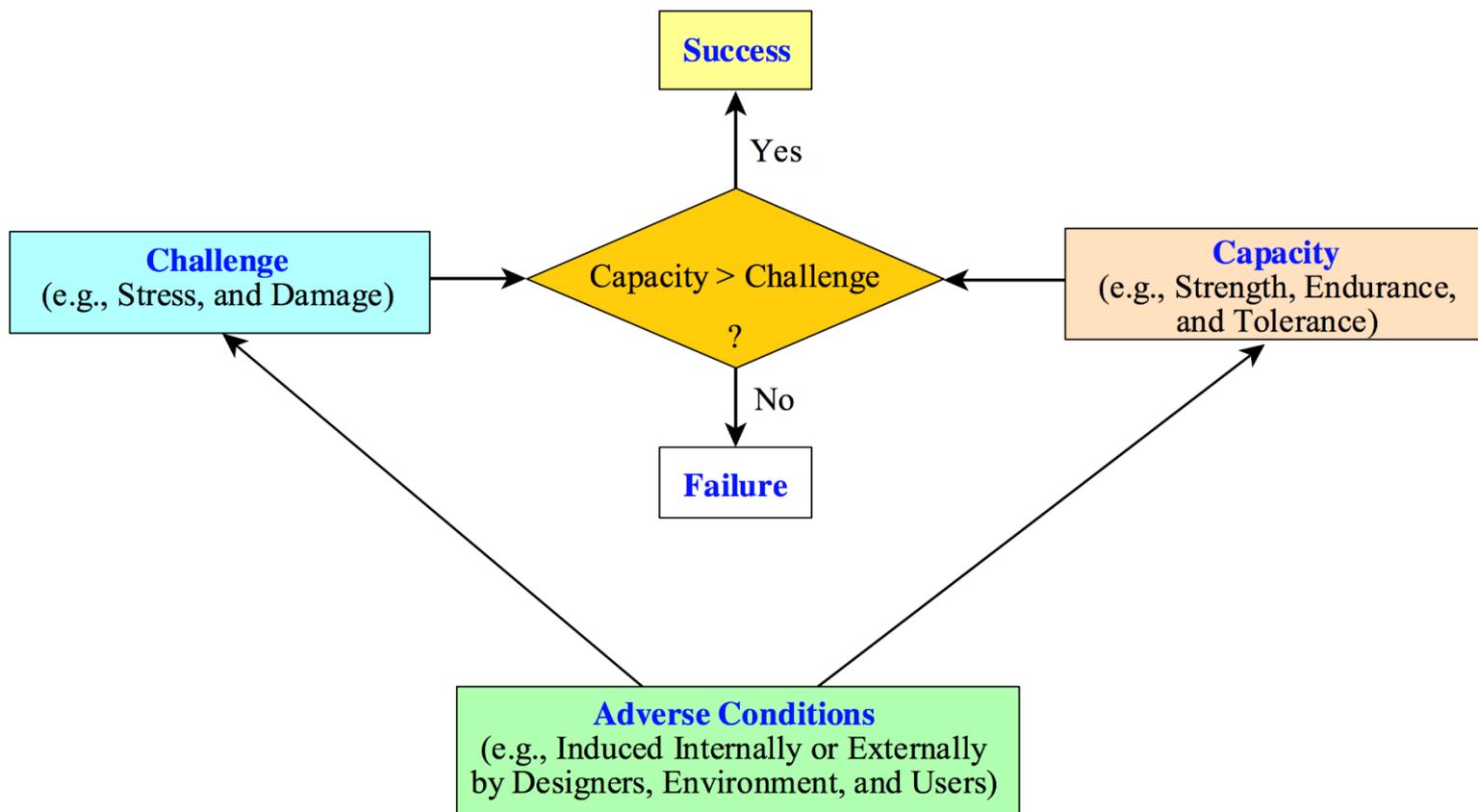
- Mechanical - แรงกระทำทางกายภาพที่รุนแรง ที่เป็นช่วง ๆ หรือความเร็วของการไหล
- Thermal - อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลัน ความร้อนสูง แรงกระทำที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ
- Electromagnetic - การสั่นสะเทือนที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- Chemical - การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น จากกรดต่าง
- Radiation - ความเปราะเนื่องจากได้รับรังสีนิวตรอน
- ความเค้นร่วมกันจากหลายกลุ่ม

2. เวลา (Time)

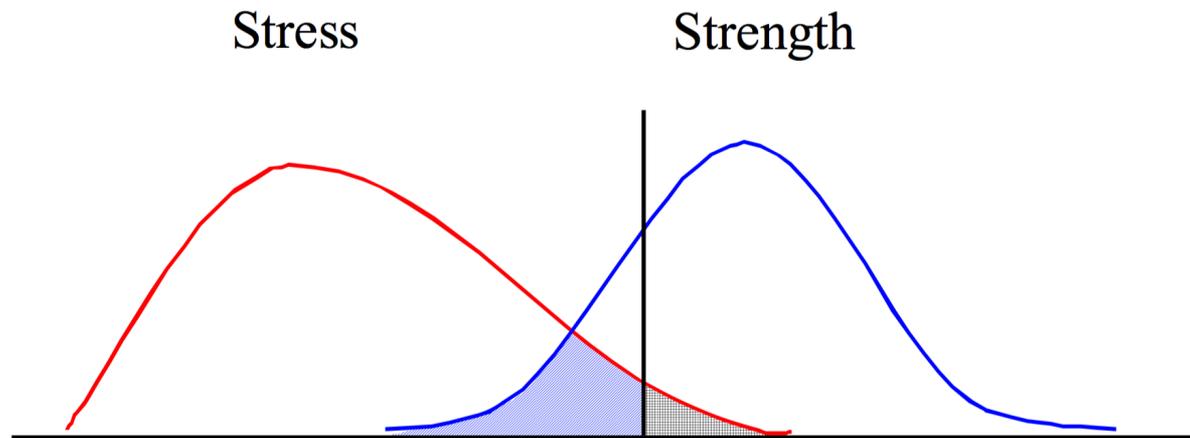
- เวลายิ่งมาก ความเสียหายก็เพิ่มมากขึ้นตามเวลา



โครงสร้างการโมเดลความเสียหาย



โมเดลความเสียหาย 1: Stress-Strength Model



ส่วนประกอบเกิดความเสียหายเมื่อ “แรงกระทำ” (Stress) มากกว่า “ความต้านทาน” (Strength)

“แรงกระทำ” (Stress) = แรงที่กระทำต่อส่วนประกอบ เช่น ทางเครื่องกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อน

“ความต้านทาน” (Strength) = ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำ

สันนิษฐานสำคัญคือ Stress ไม่มีผลกระทบถาวร (permanent effect) ต่อส่วนประกอบ



โมเดลความเสียหาย 1: Stress-Strength Model

ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำ (Stress) ต่อส่วนประกอบมากกว่าความต้าน (Strength) ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความเสียหาย (Reliability) จะเท่ากับความน่าจะเป็นที่ Stress น้อยกว่า Strength

$$R = \Pr(S > s)$$

ซึ่ง

R คือ reliability ของส่วนประกอบ

s คือ แรงกระทำ (stress)

S คือ ความต้านทาน (strength)



โมเดลความเสียหาย 2: Damage-Endurance Model

คล้ายคลึงกับ Stress-Strength Model แต่ แรงกระทำ (Stress) ทำให้เกิดความเสียหายสะสมที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (accumulates irreversibly) เช่น ความล้า (fatigue) การกัดกร่อน (corrosion) โดย ส่วนประกอบจะใช้งานได้เมื่อ “ความเสียหาย” (damage) มากกว่า “ความคงทน” (endurance) (90% ของความเสียหายจะเป็นแบบนี้)

ความเสียหาย (damage) = stress สะสมที่ทำให้เกิดความเสียหายที่ irreversible

ความคงทน (endurance) = ความสามารถที่จะคงทนต่อ damage

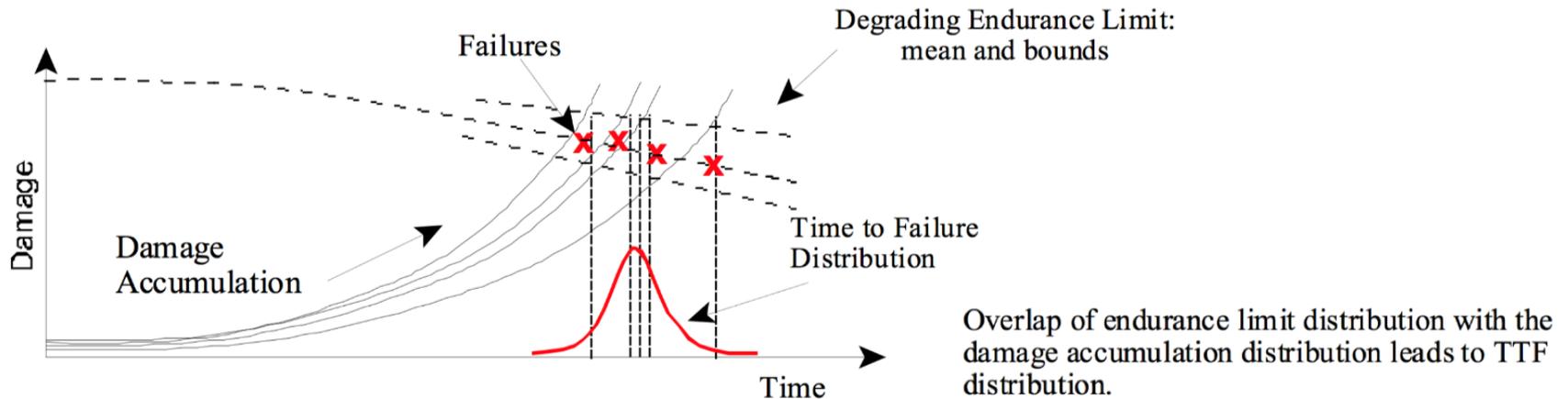
ตัวอย่าง

- การแตกร้าวแบบ Fatigued Corrosion Cracking ในท่อและส่วยประกอบอื่น
- การกัดกร่อนของ reactor vessel และ โครงสร้าง
- การสึกหรอของส่วนประกอบ เช่น pump seal หรือ bearing

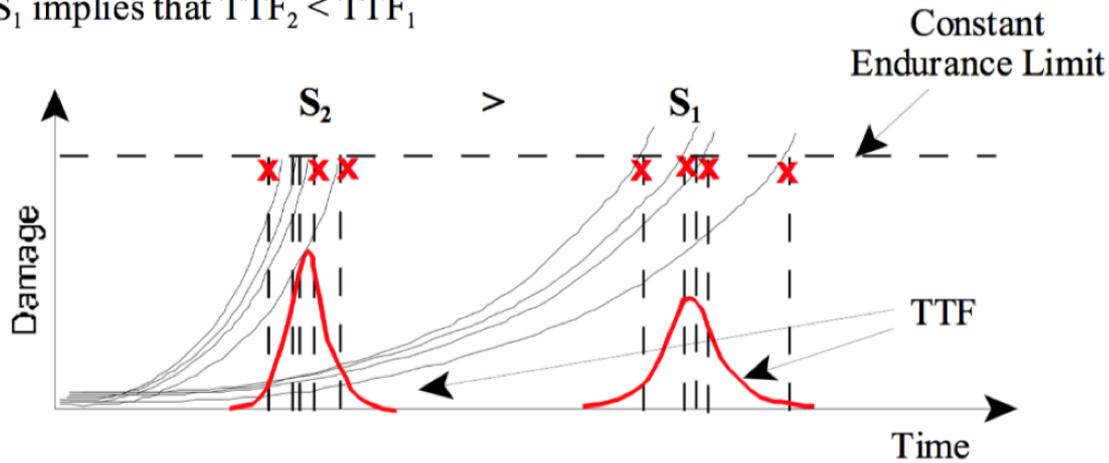
สันนิษฐานหลักคือ แรงกระทำ (Stress) ทำให้เกิดความเสียหายที่ถาวร (permanent)



โมเดลความเสียหาย 2: Damage-Endurance Model



Note: $S_2 > S_1$ implies that $TTF_2 < TTF_1$



โมเดลความเสียหาย 3: Tolerance-Requirement Model

สำหรับในกรณีที่ส่วนประกอบยังคงใช้งานได้ แต่ความเสียหายเกิดขึ้น เมื่อทำงานได้ไม่ดีพอ

ความทน (tolerance) = ระดับความเสื่อม (degradation) ต่อประสิทธิภาพ (performance) การทำงานของส่วนประกอบ

เกณฑ์กำหนด (requirements) = ลักษณะของประสิทธิภาพที่ต้องการ

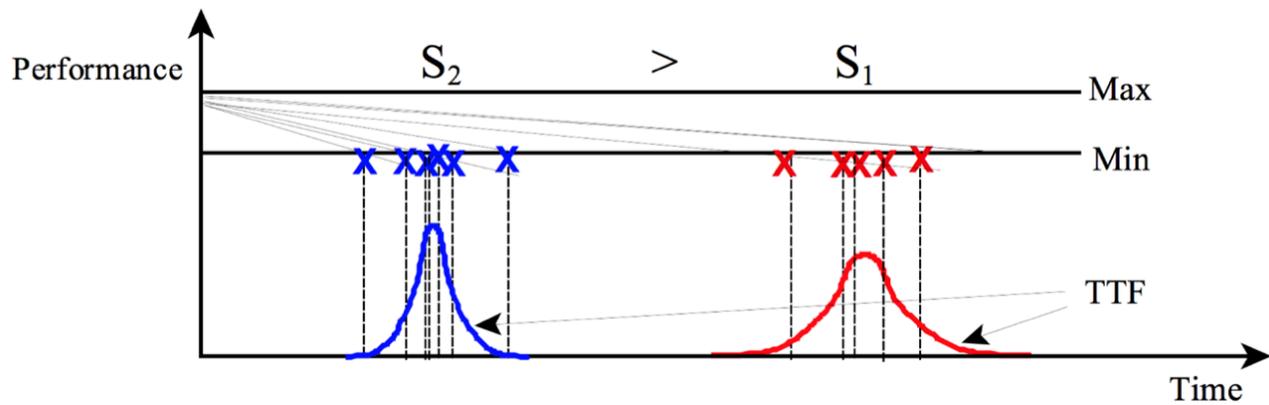
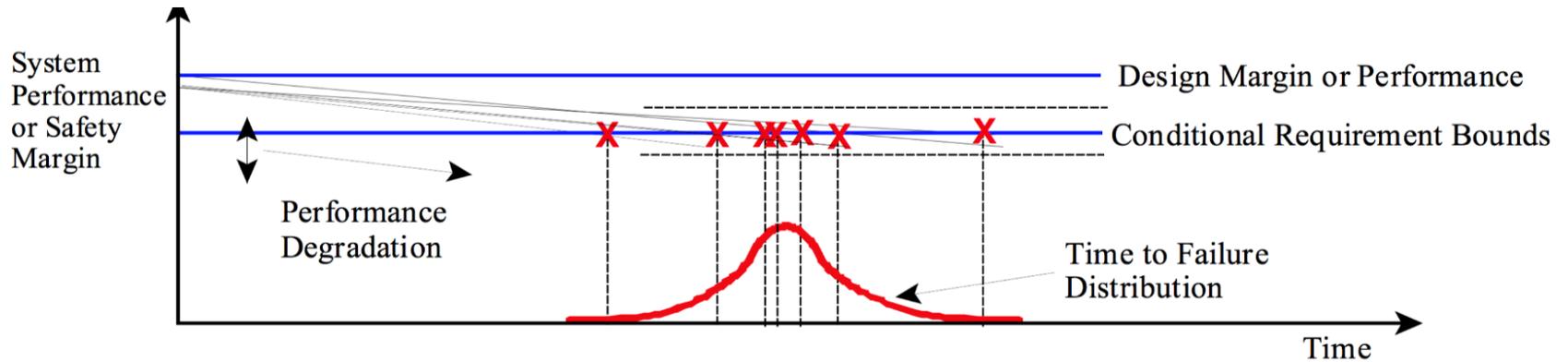
ตัวอย่าง

- การทำงานของเครื่องถ่ายเอกสาร
- ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การวัด

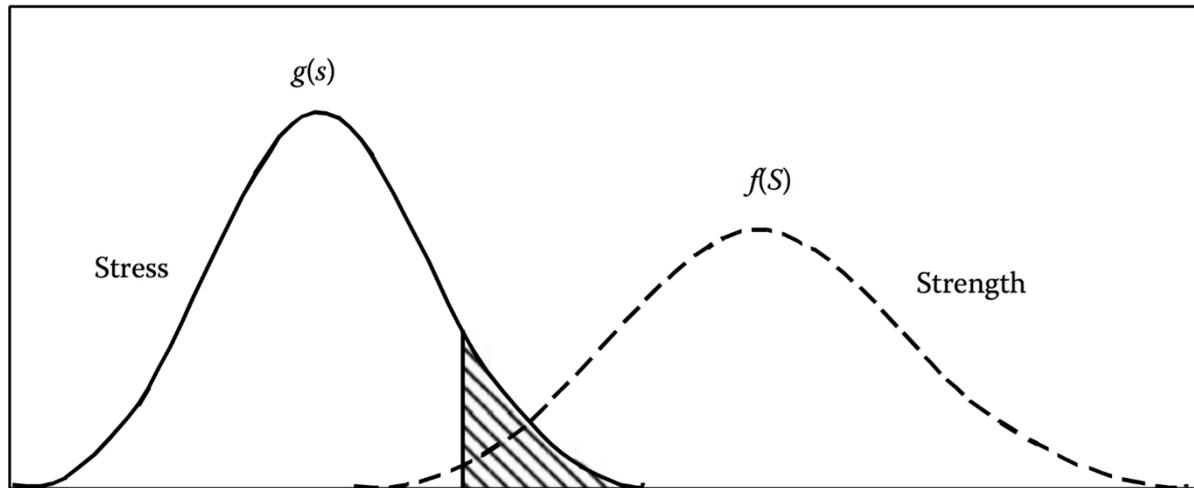
สันนิษฐานหลักคือ อายุ (aging) และ การเปลี่ยนแปลงการทำงาน (operational change) ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพ และส่วนเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin)



โมเดลความเสียหาย 3: Tolerance-Requirement Model



Safety Margin (SM)



The SM แสดงความต่าง (relative difference) ระหว่างค่าเฉลี่ยของ stress และ strength โดยที่ SM ยิ่งมาก ส่วนประกอบก็จะมี reliability มากขึ้น

$$SM = \frac{E(S) - E(s)}{\sqrt{\text{var}(S) + \text{var}(s)}}$$



ตัวอย่างกลไกความเสียหาย

Stress-Induced	Strength-Reduced	Stress-Increased
Brittle Fracture	Wear	Fatigue
Buckling	Corrosion	Radiation
Yield	Cracking	Thermal-shock
Impact	Diffusion	Impact
Ductile Fracture	Creep	Fretting
Elastic Deformation	Radiation damage	
	Fretting	



กลไกความเสียหายและตัวเร่งให้เกิดความเสียหาย

Wearout Failure Mechanisms	Acceleration Stresses (Agents)
Fatigue crack initiation	Mechanical stress/strain range, Cyclic temperature range, Frequency
Fatigue crack propagation	Mechanical stress range, Cyclic temperature range, Frequency
Creep	Mechanical stress, Temperature
Wear	Contact force, Relative sliding velocity
Diffusion	Temperature, Concentration gradient
Interdiffusion	Temperature
Corrosion	Temperature, Relative humidity
Electromigration	Current density, Temperature, Temperature gradient
Dendritic growth	Voltage differential
Radiation damage	Intensity of radiation
Surface charge spreading	Temperature
Slow trapping	Temperature
Stress corrosion	Mechanical stress, Temperature, Relative humidity



การจัดทำพารามิเตอร์ของโมเดลการเสื่อมสภาพ

ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์สำคัญของวัสดุหรือส่วนประกอบ (เช่น mechanical strength, capacitor leakage, transistor threshold voltage, brake-lining thickness) เสื่อมลงตามเวลา (degradation)

ให้ S คือ พารามิเตอร์สำคัญ (critically important material/device parameter) โดยสันนิษฐานว่า S เปลี่ยนแปลงอย่างช้าเทียบกับอายุการใช้งาน และเป็นไปในทิศทางเดียว

ถ้าทำ Taylor expansion ที่ $t=0$ จะได้ Maclaurin Series

$$S(t) = S_{t=0} + \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right)_{t=0} t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} \right)_{t=0} t^2 + \dots$$

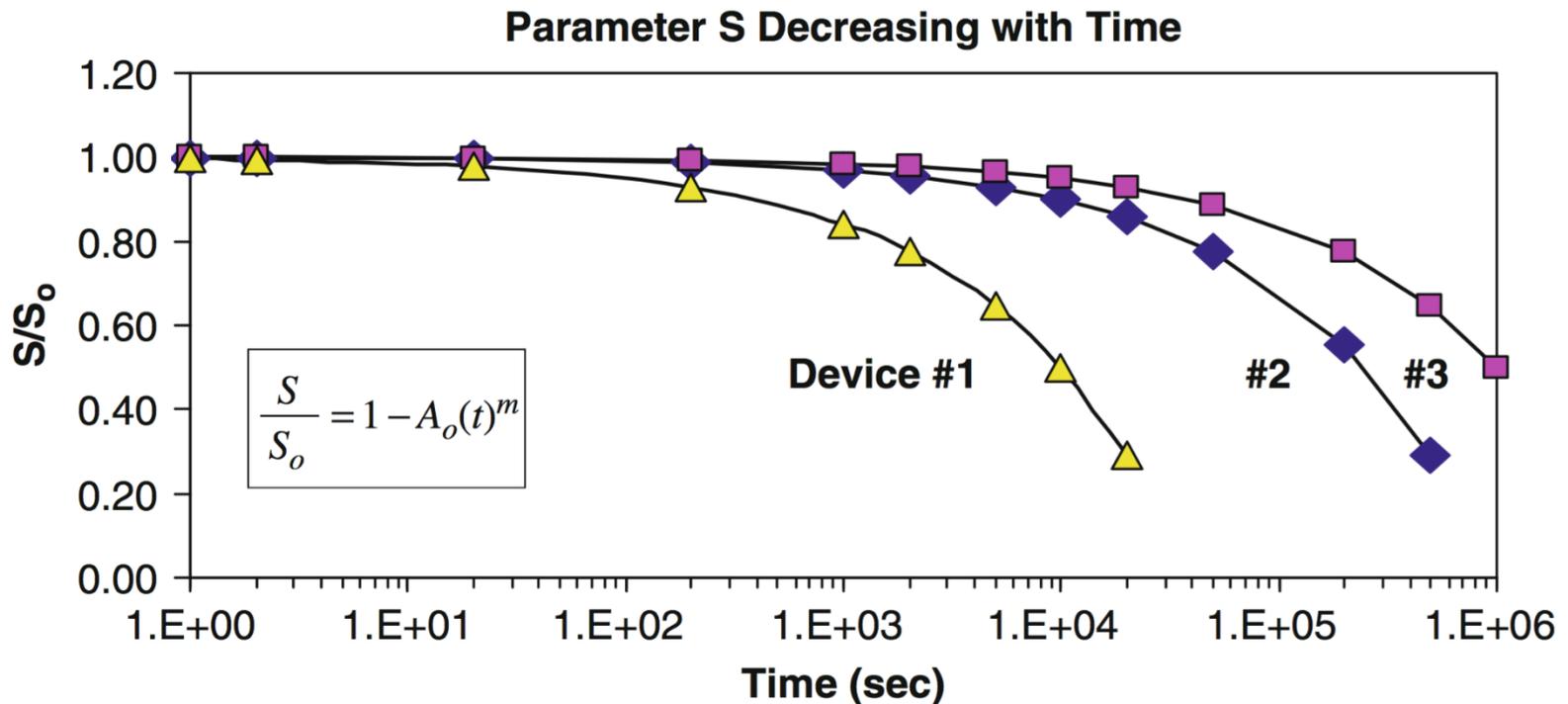
ถ้าใช้การประมาณ higher order terms ด้วย power-law จะได้ว่า

$$S = S_o [1 \pm A_o(t)^m],$$



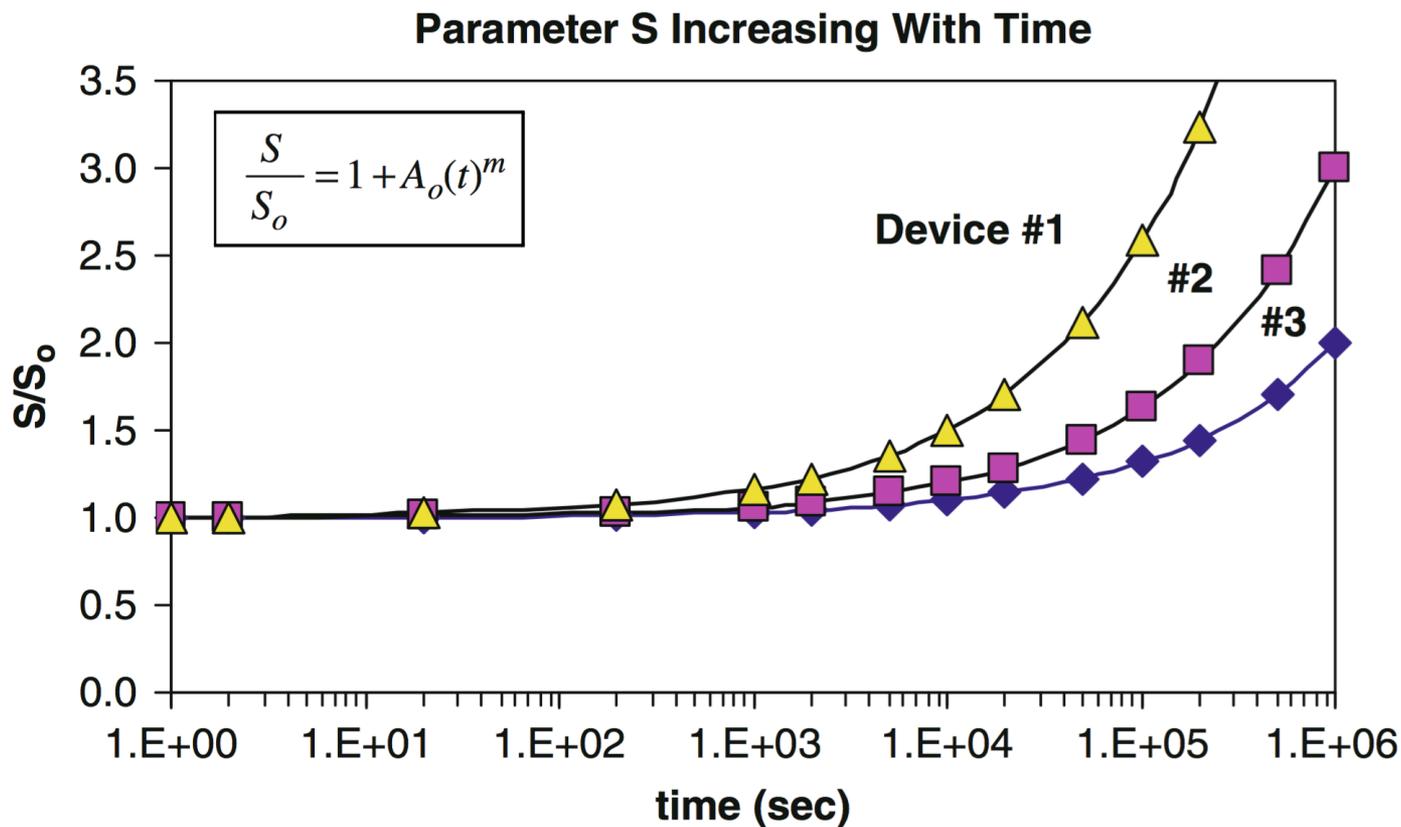
พารามิเตอร์สำคัญที่ลดลงตามเวลา

พารามิเตอร์สำคัญ (critically important parameter) S ที่ลดลงตามเวลา $S = S_o[1 - A_o(t)^m]$.



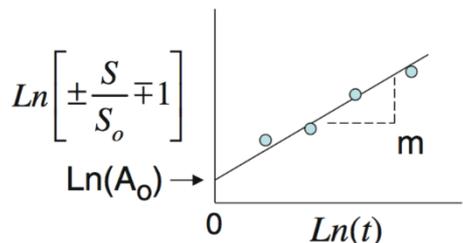
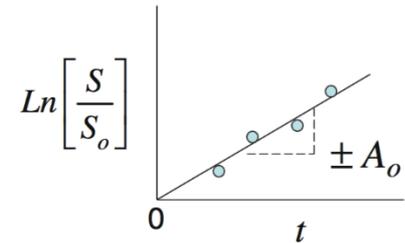
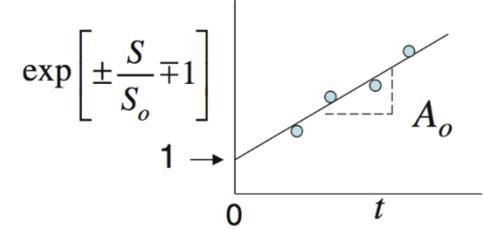
พารามิเตอร์สำคัญที่เพิ่มขึ้นตามเวลา

พารามิเตอร์สำคัญ (critically important parameter) S ที่เพิ่มขึ้นตามเวลา $S = S_o[1 + A_o(t)^m]$,



โมเดลความเสื่อมตามเวลาทั่วไป

Table 2.1 Selected Time-Dependent Degradation Models.

<p><u>Power-Law</u></p> $S = S_o [1 \pm A_o (t)^m]$	
<p><u>Exponential</u></p> $S = S_o \exp(\pm A_o t)$	
<p><u>Logarithmic</u></p> $S = S_o [1 \pm \ln(A_o t + 1)]$	

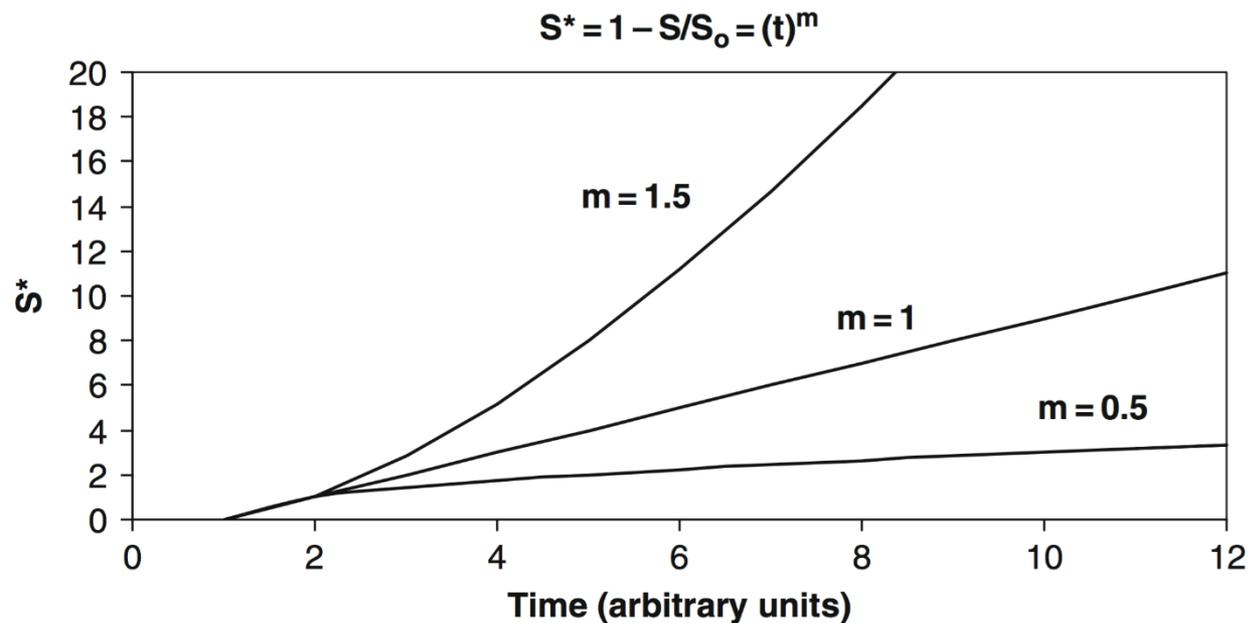


โมเดลอัตราความเสื่อม

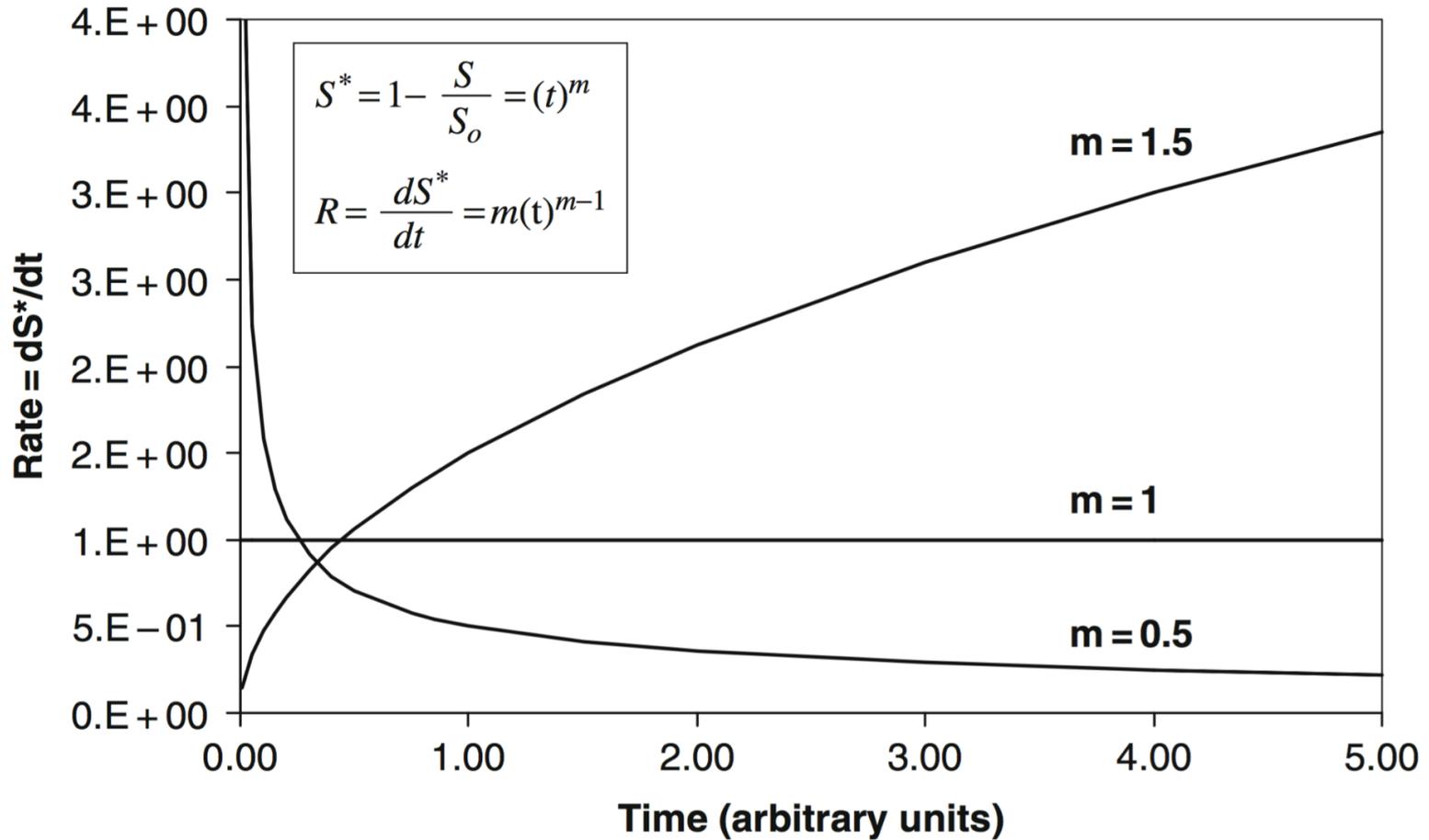
อัตราความเสื่อม (degradation rate) คือ

$$R = \frac{dS^*}{dt} = m(t)^{m-1}.$$

โดยที่ $m=1$ คือ อัตราความเสื่อมคงที่, $m < 1$ คืออัตราความเสื่อมลดลงตามเวลา, $m > 1$ คือ อัตราความเสื่อมเพิ่มขึ้นตามเวลา



โมเดลอัตราความเสื่อม

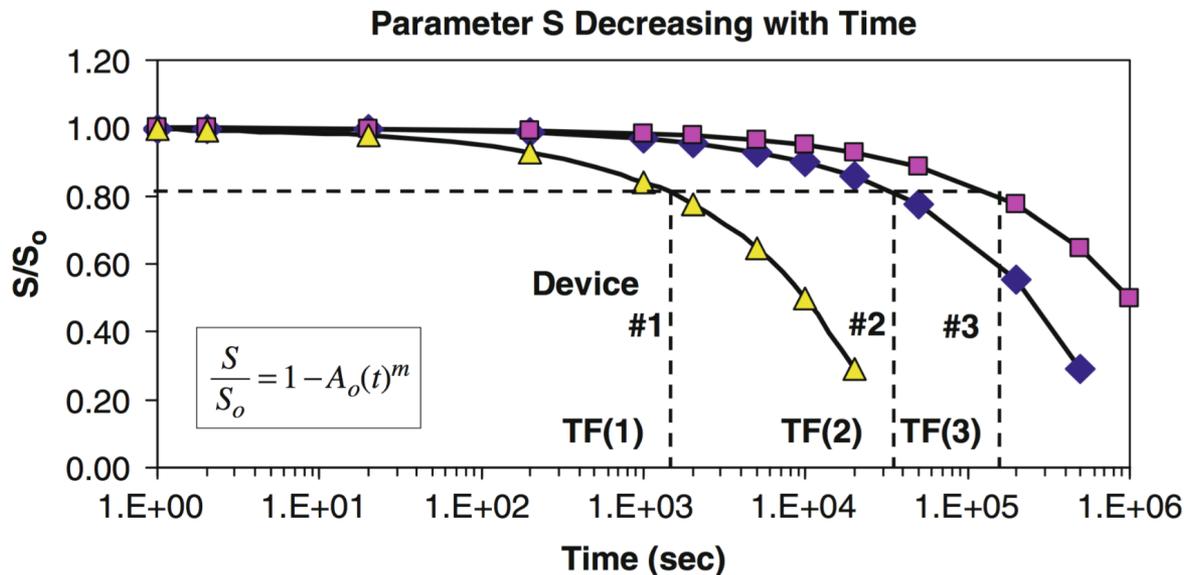


เวลาที่เกิดความเสียหาย (Time-To-Failure)

คำนวณให้ได้เวลา จะได้ว่า $t = \left[\frac{1}{\pm A_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \right]^{1/m}$.

เวลาที่เกิดความเสียหาย (Time-To-Failure; $t = TF$) เกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งถึงจุดวิกฤตที่อุปกรณ์หรือส่วนประกอบไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป

$$TF = \left[\frac{1}{\pm A_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right)_{crit} \right]^{1/m}$$

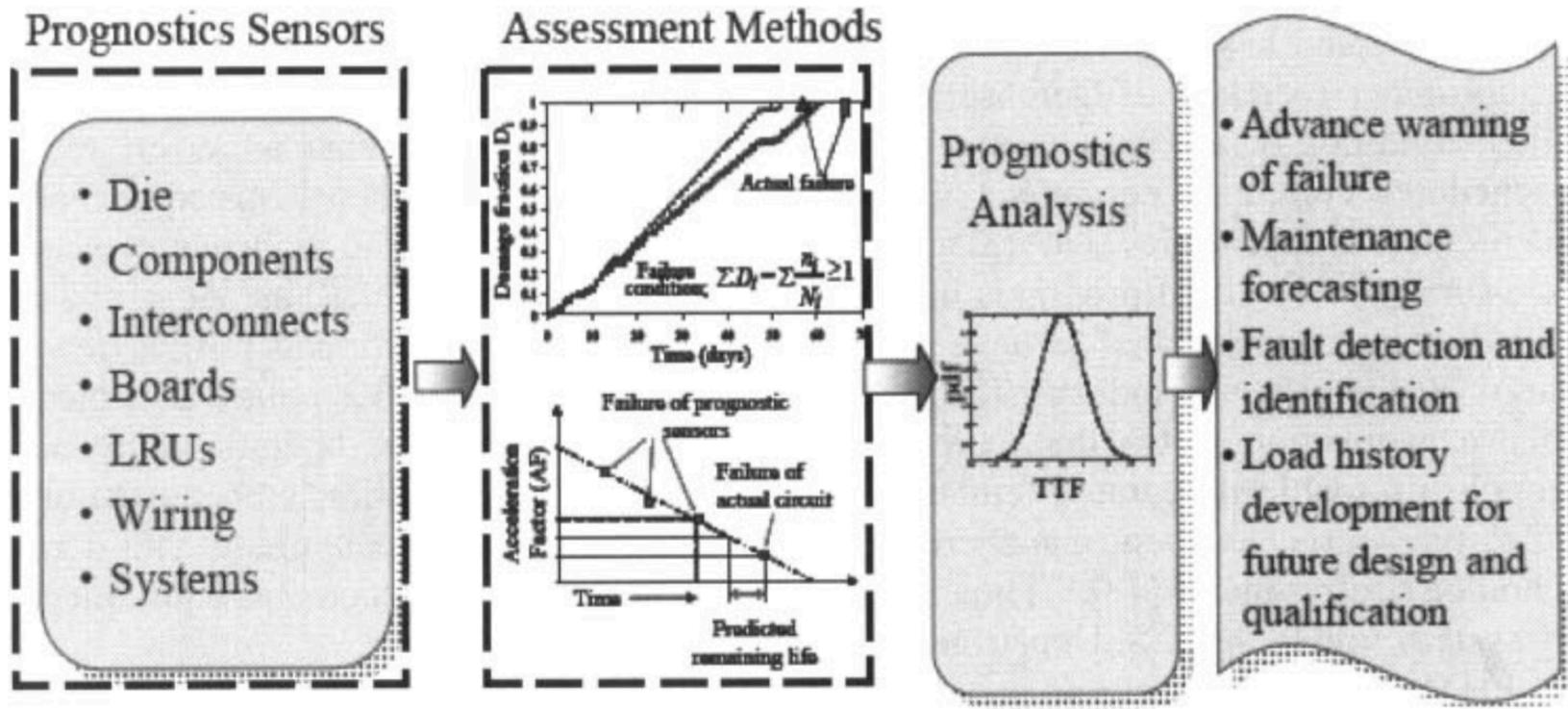


Prognostics and health management (PHM)

- Prognostics and health management (PHM) คือวิธีการที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ reliability ของอุปกรณ์หรือระบบภายใต้สภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง
- เมื่อรวมกับโมเดล Physics of Failure ทำให้สามารถปรับปรุงการคาดการณ์สถานะภาพของอุปกรณ์หรือระบบภายใต้การทำงานและสภาพแวดล้อมจริง
- เทคนิค PHM เมื่อรวมกับ การตรวจวัด การบันทึกผล การประเมินพารามิเตอร์ของสภาพแวดล้อม การทำงาน และประสิทธิภาพ ที่บ่งบอกสถานะภาพของระบบ
- PHM สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังนี้
 - Performance degradation - ประสิทธิภาพของการทำงานลดลง
 - Physical or electrical degradation - การเสื่อมสภาพทางกายภาพหรือไฟฟ้า
 - Changes in a life-cycle profile - การเปลี่ยนแปลงของสภาพการทำงาน



โครงสร้างการทำ PHM

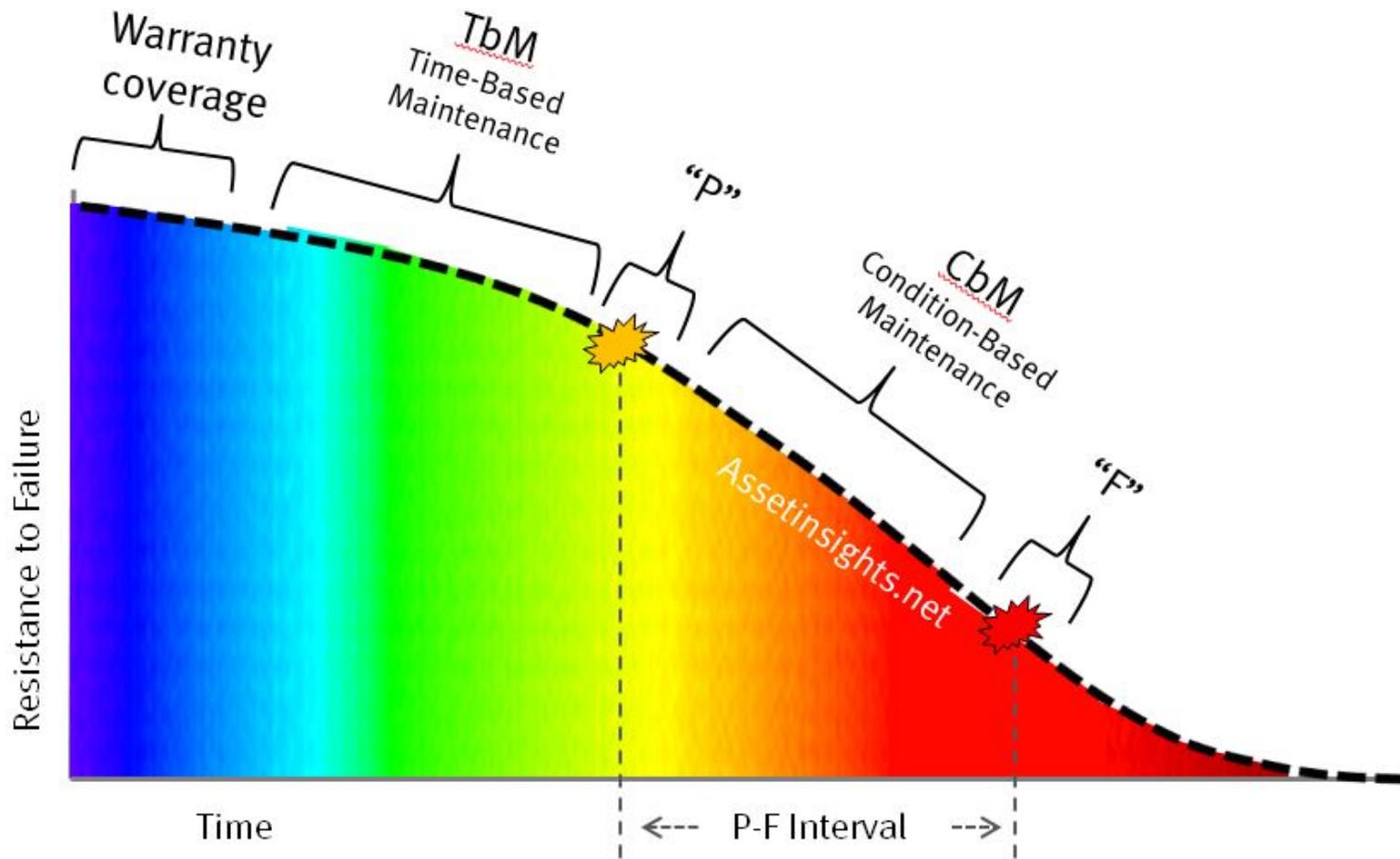


ข้อดีของการทำ PHM

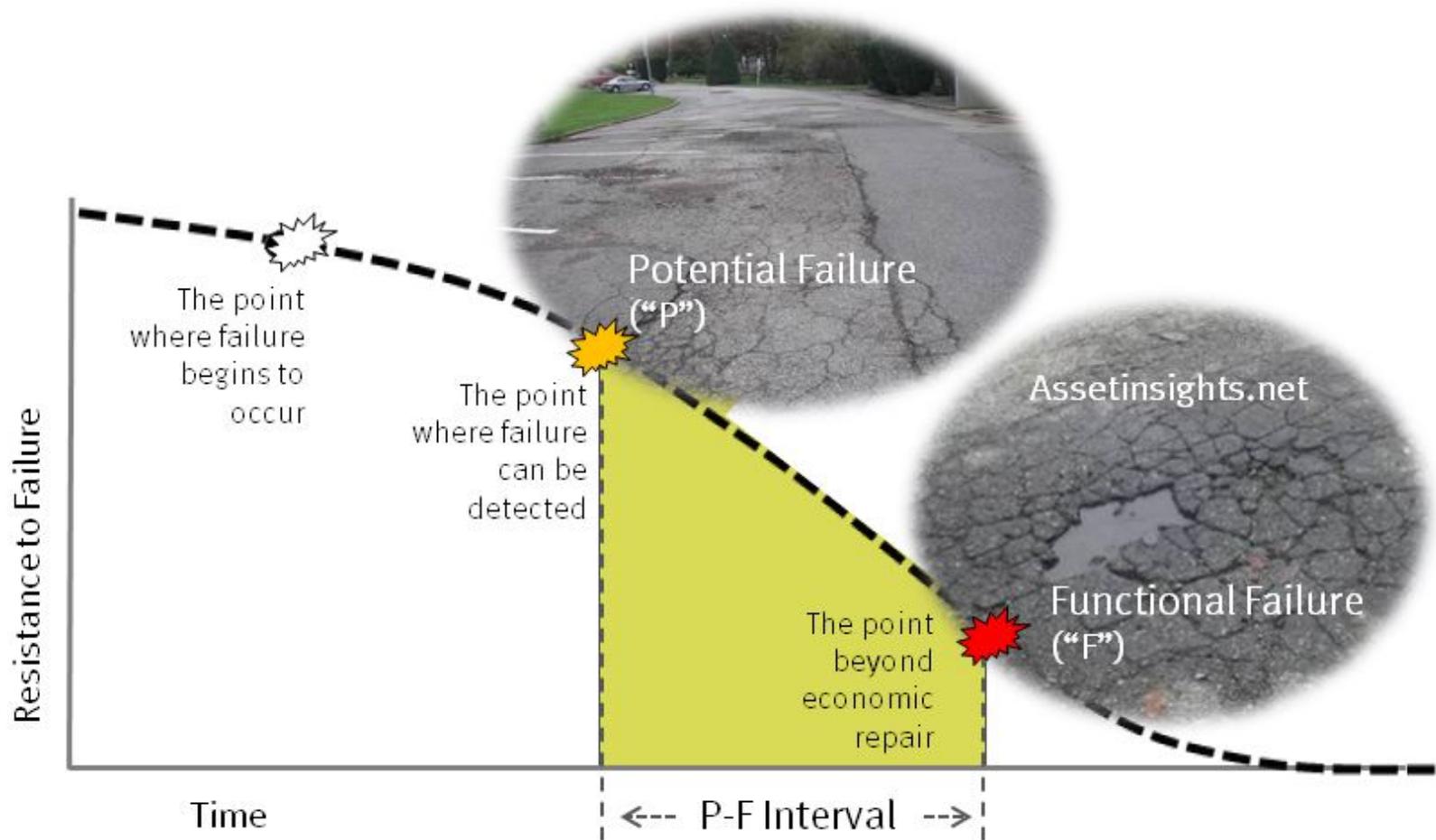
- (1) มีการแจ้งเตือนล่วงหน้าก่อนที่จะเกิดความเสียหาย
- (2) ลดการซ่อมแซมที่ไม่ได้วางแผนไว้ ขยายเวลาระหว่างการบำรุงรักษา และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำการซ่อมแซม
- (3) ลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาอุปกรณ์ โดยการลดค่าตรวจสอบ ลดเวลาที่ไม่ได้ใช้งาน และลดการสำรองอุปกรณ์ทดแทน
- (4) ปรับปรุงพัฒนาคุณสมบัติและช่วยเหลือในการออกแบบและการออกดูแลระบบในอนาคต



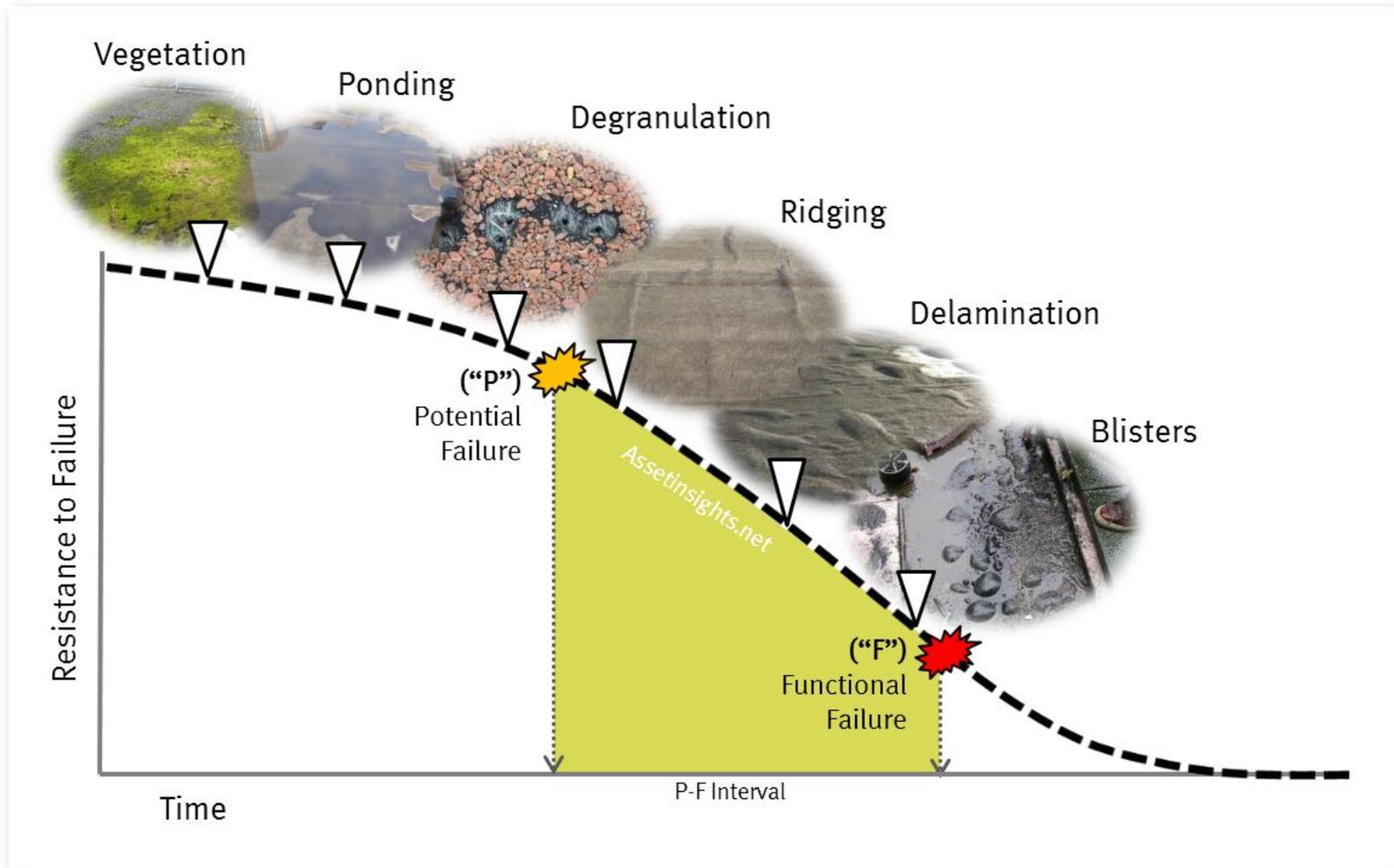
Condition-Based Maintenance (CBM)



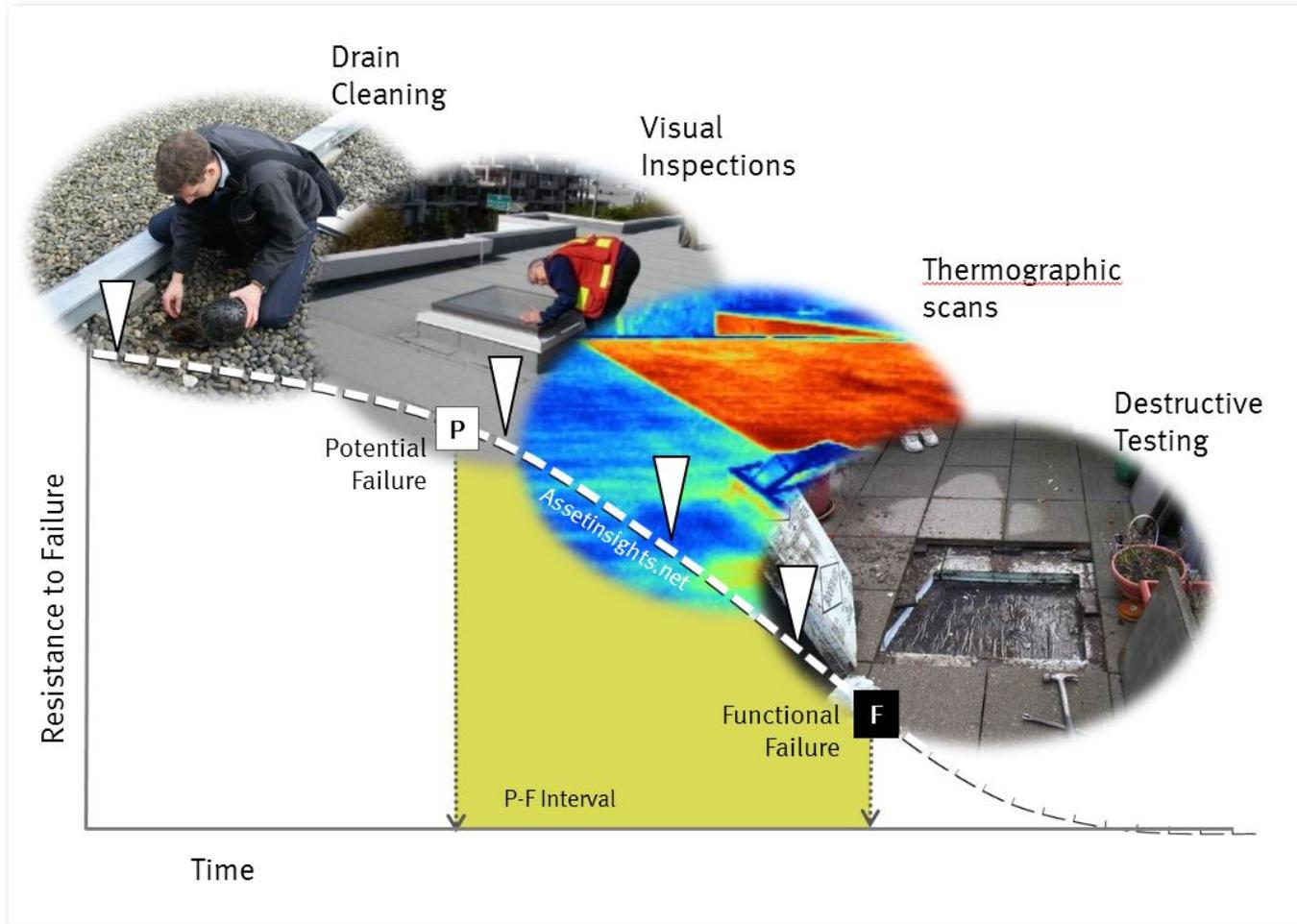
ระยะเวลาระหว่าง P และ F (P-F interval)



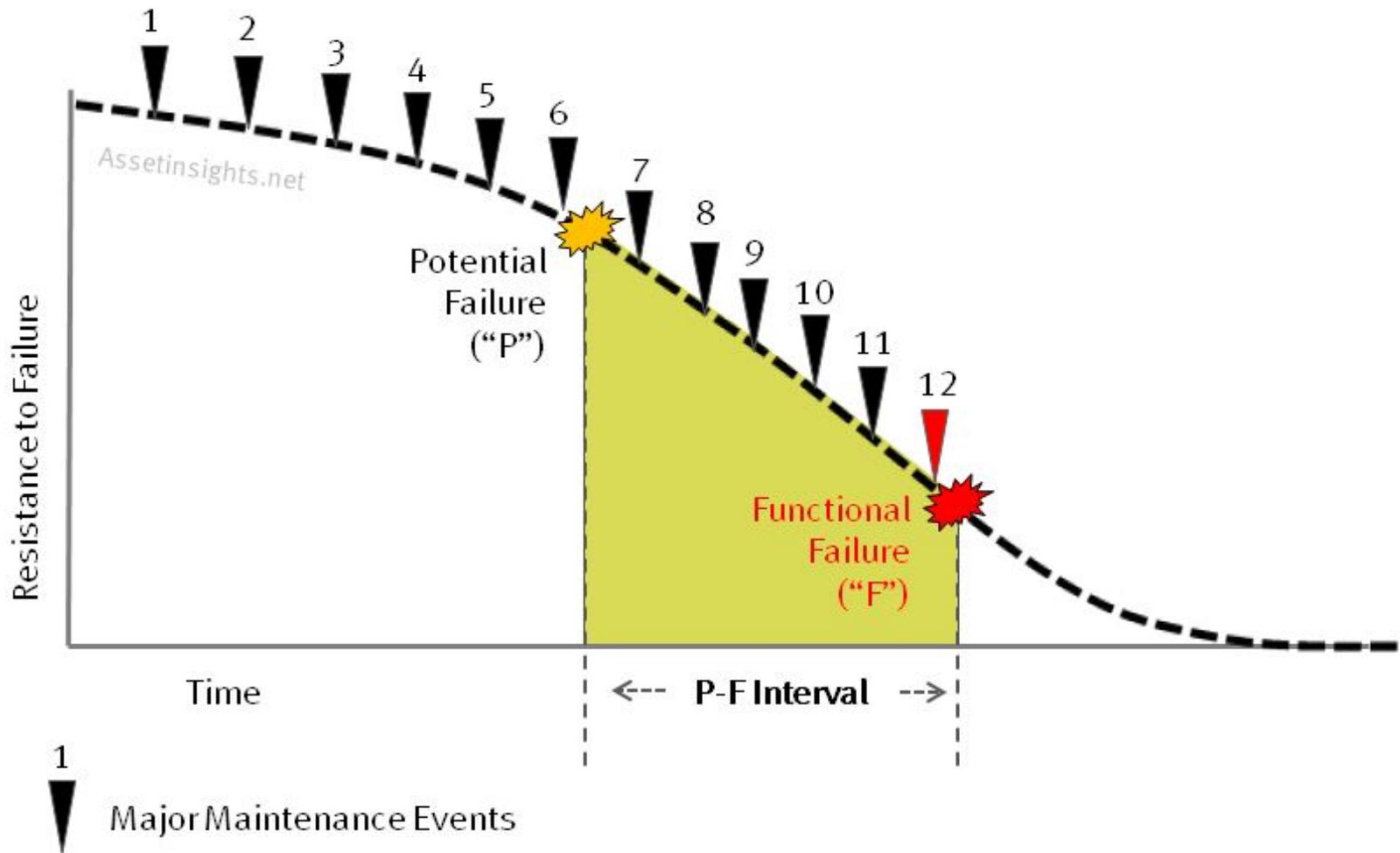
โมเดลการเสื่อมสภาพ (Deterioration Model)



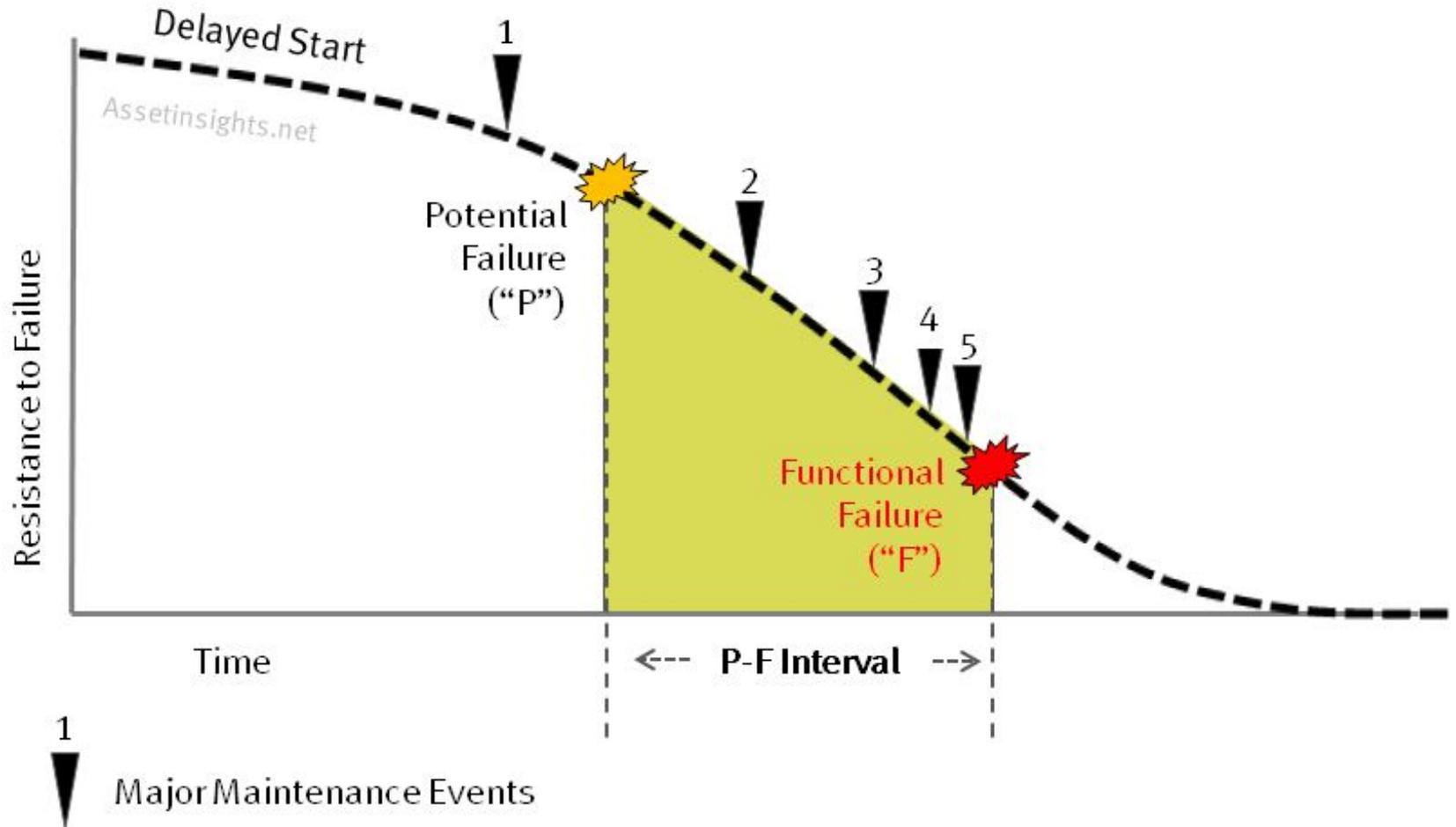
ตัวอย่างหน้าที่หลักในการบำรุงรักษา (Maintenance)



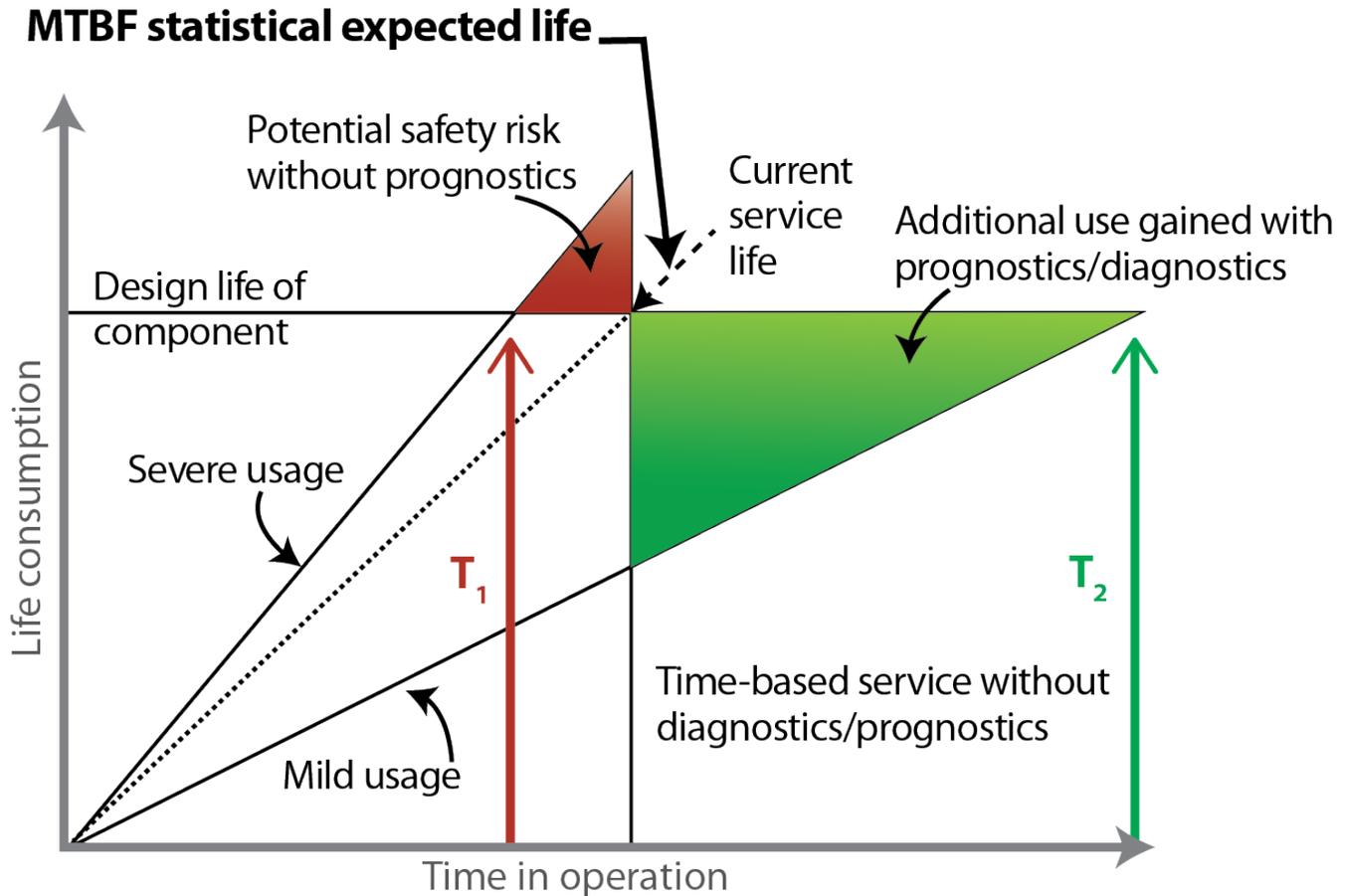
ระยะเวลาระหว่างบำรุงรักษาครั้งที่



ระยะเวลาระหว่างการบำรุงรักษาไม่คงที่



ข้อดีของการทำ CBM



Source: Economic and Safety Benefits of Diagnostics & Prognostics (Romero et al. 1996)

00514



ตัวอย่างปัญหา Reliability ใน Hard Disk



ตัวอย่างปัญหา Reliability ใน Hard Disk

Reliability Issues	Parameters Monitored
<ul style="list-style-type: none"> • Head assembly <ul style="list-style-type: none"> - Crack on head - Head contamination or resonance - Bad connection to electronics module • Motors/bearings <ul style="list-style-type: none"> - Motor failure - Worn bearing - Excessive run-out - No spin • Electronic module <ul style="list-style-type: none"> - Circuit/chip failure - Interconnection/solder joint failure - Bad connection to drive or bus • Media <ul style="list-style-type: none"> - Scratch/defects - Retries - Bad servo - ECC corrections 	<ul style="list-style-type: none"> • Head flying height: A downward trend in flying height will often precede a head crash. • Error checking and orrection (ECC) use and error counts: The number of errors encountered by the drive, even if corrected internally, often signals problems developing with the drive. • Spin-up time: Changes in spin-up time can reflect problems with the spindle motor. • Temperature: Increases in drive temperature often signal spindle motor problems. • Data throughput: Reduction in the transfer rate of data can signal various internal problems.

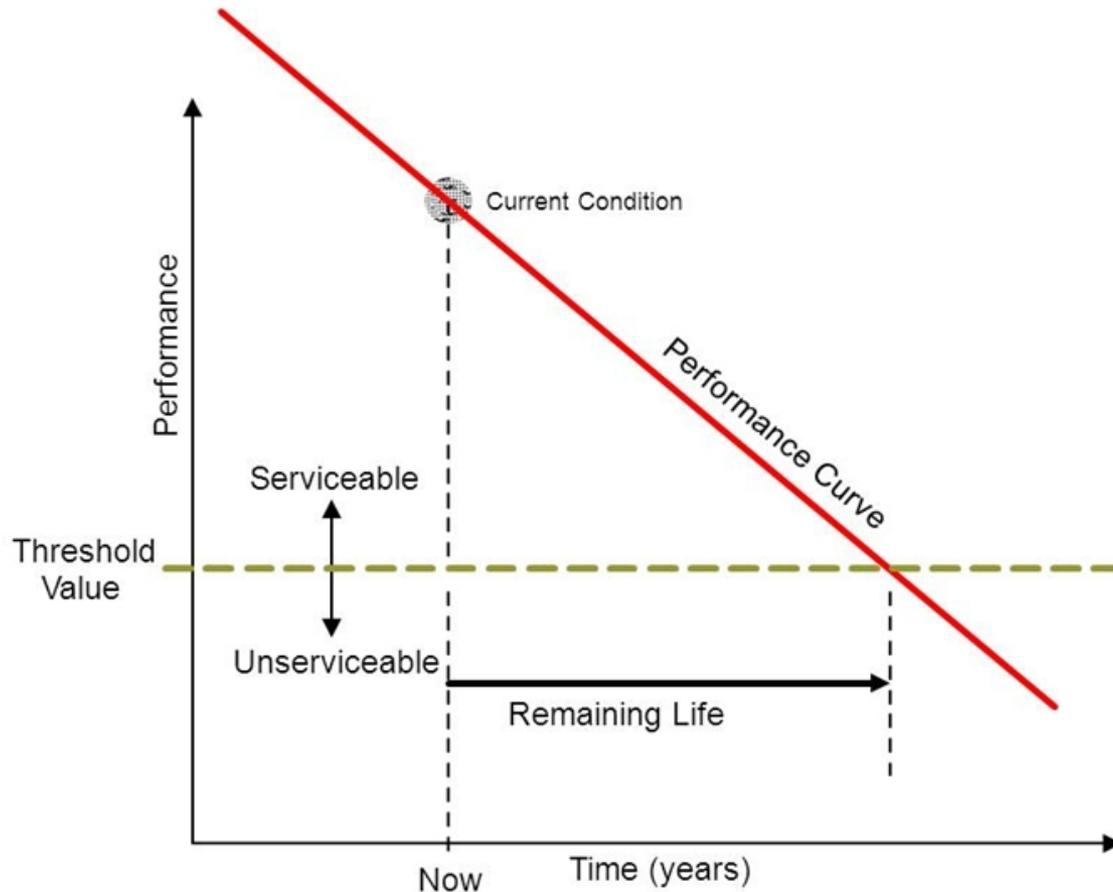


ตัวอย่าง Life-Cycle Loads

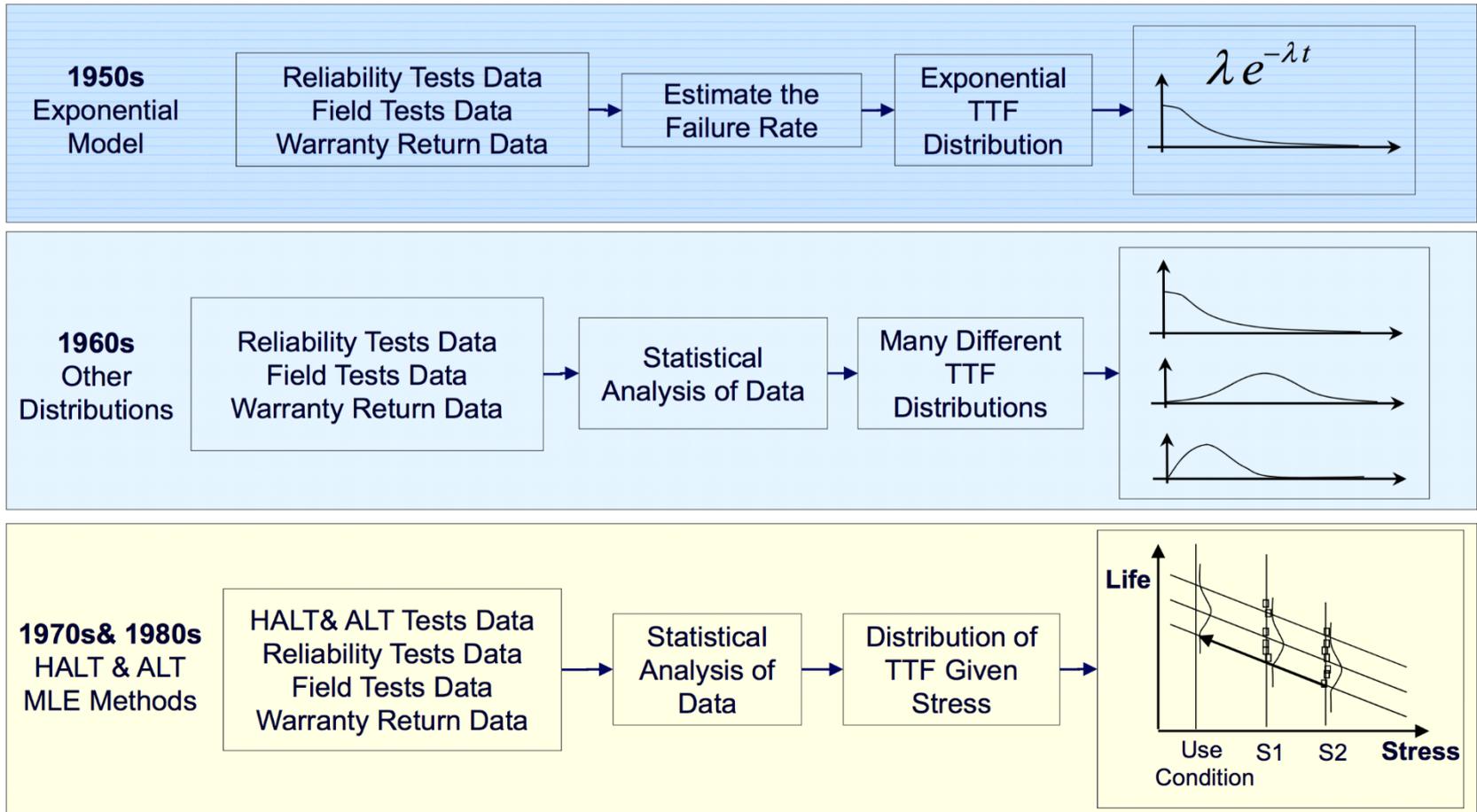
Load	Load Conditions
Thermal	Steady-state temperature, temperature ranges, temperature cycles, temperature gradients, ramp rates, heat dissipation
Mechanical	Pressure magnitude, pressure gradient, vibration, shock load, acoustic level, strain, stress
Chemical	Agressive versus inert environment, humidity level, contamination, ozone, pollution, fuel spills
Physical	Radiation, electromagnetic interference, altitude
Electrical	Current, voltage, power, resistance



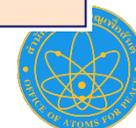
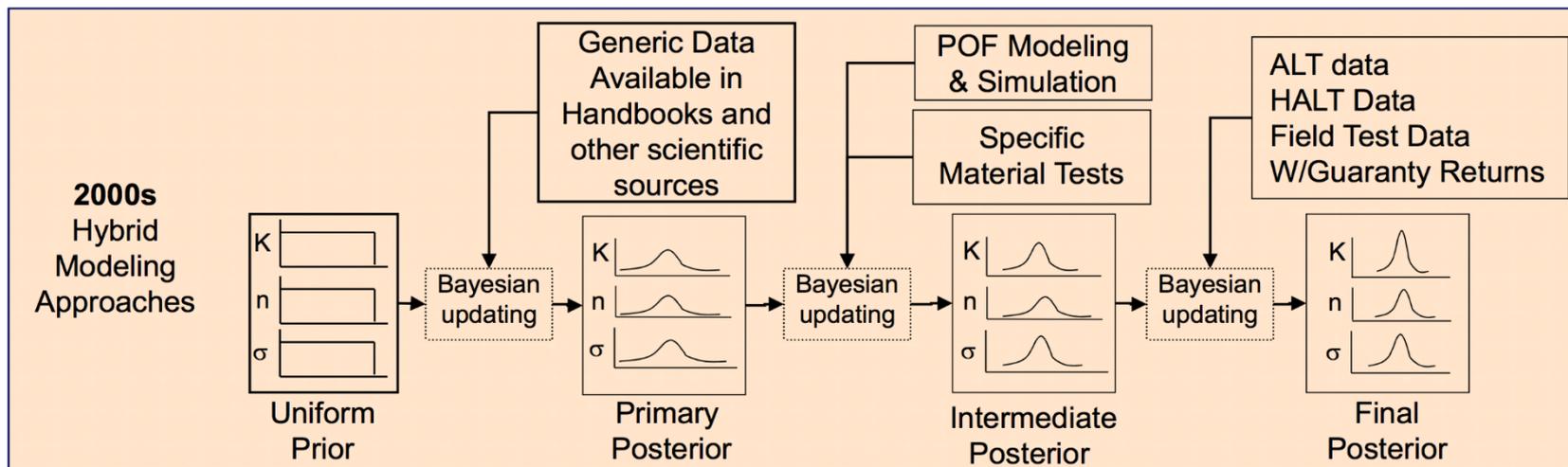
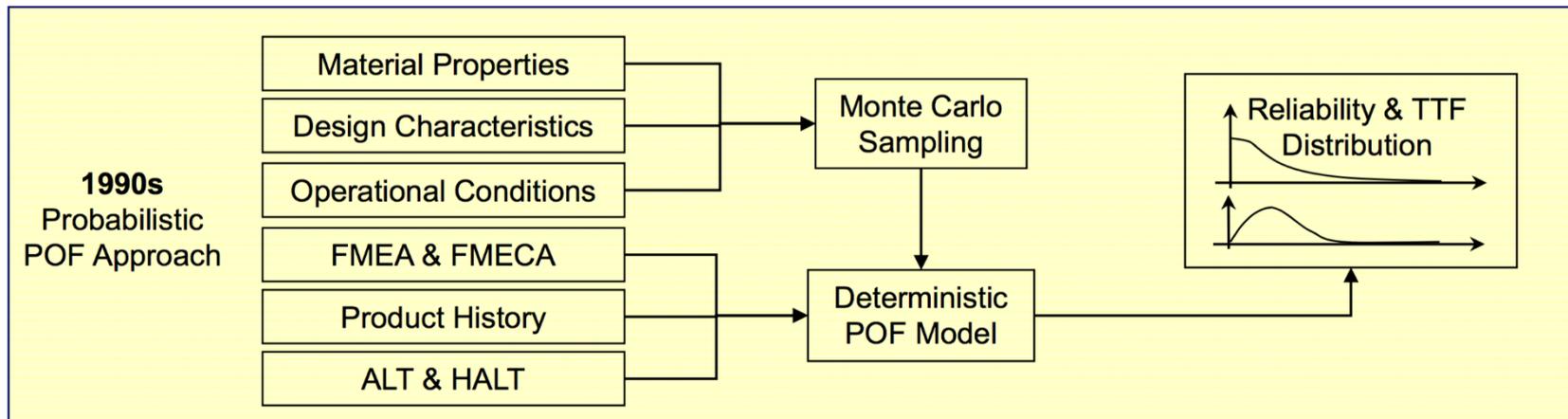
อายุการใช้งานที่เหลือ Remaining Useful Life (RUL)



แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการวิเคราะห์ Reliability



แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการวิเคราะห์ Reliability



References

- IAEA, SAFETY SERIES SSG-3: Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. 2010.
- IAEA, TECDOC-1511: Determining PSA Quality for Applications in NPPs. 2006.
- Modarres, Mohammad, Mark P. Kaminskiy, and Vasiliy Krivtsov. “Reliability engineering and risk analysis: a practical guide”. CRC press, 2016.
- Christian Kirchsteiger, On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12 (1999) 399–419.
- NRG, Training Course on “Requirements and safety evaluation of NPP PSA”, INSC Project MC3.01/13, Training and Tutoring for experts of the NRAs and their TSOs for developing or strengthening their regulatory and technical capabilities.
- F.C. Brayon, M. Mazlehab, P. Prak Tomb, A.H.S Mohd Sarifc, Z. Ramlia, F. Zakariab, F. Mohamedc, Abid Aslamd, A. Lyubarskiye, I.Kuzminae, P.Hughese , A.Ulsese, Building Competence for Safety Assessment of Nuclear Installations: Applying IAEA's Safety Guide for the Development of a Level 1 Probabilistic Safety Assessment for the TRIGA Research Reactor in Malaysia
- K. Simola, Reliability methods in nuclear power plant ageing management, VTT Publications 379, Technical Research Centre of Finland ESPOO 1999.
- JRC Scientific and Technical Reports, Guidelines for Analysis of Data Related to Ageing of Nuclear Power Plant Components and Systems, EUR 23954 EN - 2009

