



● 彈藥管理

彈藥儲存可靠度概觀—— 兼論超量彈藥之處理

提要

林鵬舉

- 一、與武器裝備不同的是，彈藥是一次性使用之產品，如何在需用的時候（戰爭、演訓）發揮其應有功效，則其儲存壽期與儲存可靠度的議題就顯得格外重要；國軍過往皆著重於武器裝備/系統之可靠度（Reliability）與妥善率（Availability）的探討，但對於彈藥儲存可靠度的研究則付之闕如且缺乏系統性的論證。
- 二、彈藥儲存受環境因素的影響甚鉅，本文藉由可靠度的基本觀念，引介美軍最新準則，探究國軍執行彈藥儲存可靠度的可行作法。
- 三、國軍經歷精實案、精進案後，正邁向全募兵制的國防轉型（Defense Transformation）過程，鑒於目標年度之兵力員額已與實施募兵前之原編裝員額縮減甚多，則產生超量配賦的情形下，如何處理超量彈藥，以及維持募兵制體系下編裝配賦內之彈藥儲存可靠度，現階段對國軍相關從業人員而言，是一項難題；因此，本文介紹國外相關資料，提供國內可行方案建議，俾建立未來國軍彈藥專業標準。

關鍵詞：彈藥儲存可靠度（Ammunition Stockpile Reliability）、國防轉型（Defense Transformation）、超量彈藥（Excess Ammunition/or Surplus Ammunition）

壹、前言

彈藥儲存可靠度 (Ammunition Stockpile Reliability)，並非是一個嶄新的觀念或字詞，相反的，它是國軍過去長期所忽視的一項議題。如何在戰爭時期或平時演訓中，發揮彈藥原本設計的效能，可靠度是其衡量的重要指標。以往，國軍多著重於彈藥儲存壽期的觀點，考量以下二者：

- 一、彈藥未達其實際儲存壽期而提前除役，將造成經濟損失。
- 二、已達彈藥實際儲存壽期而逾期服役，將增加儲存與使用上的不安全性。

由上述二者所產生出彈藥庫儲管理的各項措施與政策，事實上存在著嚴重的盲點，即：彈藥儲存壽期如何訂定？而更貼切的描述是，彈藥儲存壽期是國軍設定彈藥的應有服役年限，還是彈藥本身可以完成其功效的年限？

過去數年間，國內雖有研究者對國軍彈

藥進行效能衰退的相關研究，但多僅針對彈藥的安定性進行探討^{1,2,3}，對於彈藥的失效模式之研究則付之闕如，以致於許多彈藥長年囤儲於庫房之中，無法確切得知其是否仍能維持其應有效能，部隊演訓射擊時亦存有疑慮，不敢使用儲存超過10年以上的彈藥，寧願射擊新出廠或出廠5年內的彈藥；而在無法確知久儲彈藥的效能之情形下，亦嚴重影響庫儲單位的作業負荷，因為不知道該於何時汰換儲存已超過多少年的彈藥，也不敢撥交給部隊使用，造成惡性循環。

此外，國軍自民國86年起實施組織精簡的「精實案」兵力結構調整方案，接著從民國92年起施行「精進案」，兵力員額自民國93年的38萬5千人精簡至民國97年底完成軍事兵力轉型的27萬6千人⁴；此期間，在員額縮減情形下，全軍彈藥已產生超量配賦的情形。而在配合國防轉型的進程下，我國《兵役法》已於民國101年12月28日完成部分條文增修訂⁵，賦予募兵制法源基礎，規劃實施目標年度自民

- 1 林傳堯、陸開泰、葉早發、林鵬舉、胡鄭菁、劉台傑，〈國軍庫儲發射藥安定劑衰退曲線及有效儲存壽期評估〉《火藥技術》，第25卷第1期，西元2009年，頁47-58。
- 2 孫成道、陸開泰、葉早發、林鵬舉、許柏鴻、劉台傑，〈以加速老化試驗法分析發射藥安定劑衰退曲線之研究〉《火藥技術》，第26卷第2期，西元2010年，頁1-14。
- 3 鄭正發，〈長期儲存火炸藥安定性分析及安全量距評估之研究〉(國防大學理工學院應用化學研究所碩士論文，西元2010年)。
- 4 韓曜庭，〈國軍組織的再精進與調整《四年期國防總檢討》的觀察與分析〉(陸軍官校八十六週年校慶基礎學術暨通識教育研討會，西元2010年)，頁PO-311-PO-326。
- 5 《兵役法》，中華民國100年12月28日總統華總一義字第10000294221號令修正公布第4、16、25、27、32-35、44、45條條文；並增訂第16-1、20-1條條文。



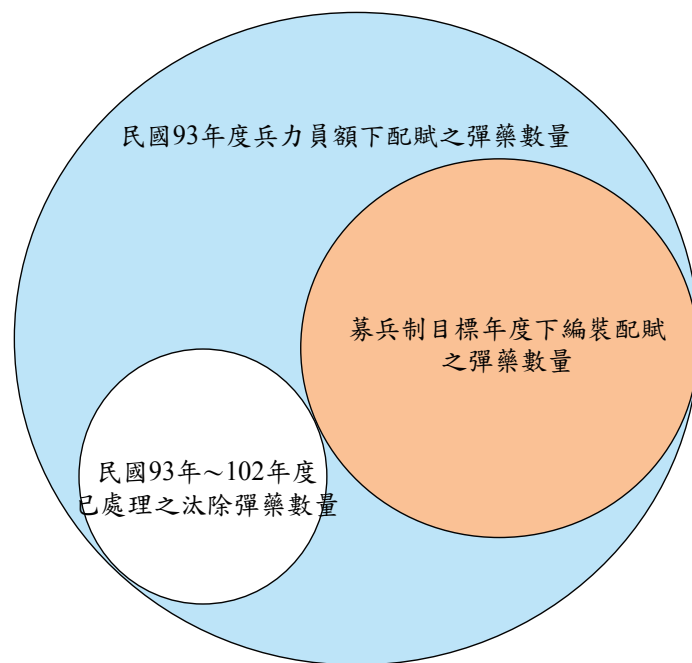
國103年底以後，常備部隊皆由志願役人員擔任；此表示募兵制已為我國未來組建軍事力量的兵役制度^{6,7}。

依我國《民國102年國防報告書》內容：「民國103年底國軍總員額由27萬5千人調降至21萬5千人」⁸，則總計自民國93年至民國103年的10年之間，共縮減17萬名兵力員額，期間，衍生出鉅額的超量彈藥（Excess Ammunition/or Surplus Ammunition），已形成庫儲繁荷的沉重壓力；然而，更值得注意的是，應如何處理超量彈藥？

圖一是一個示例⁹，白色區域是奉核定汰除彈藥已處理完畢的數量（包含廢彈），則扣除掉白色與橙色區域後，藍色區域則為超量彈藥部分；此處，藍色區域內有多少數量是可用彈藥（Available Ammunition），有多少是不符現代戰爭所需的不適用彈藥（Unavailable Ammunition），又有多少是已列廢待處理的廢彈（Waste

Ammunition），以及橙色區域之彈藥數量在其服役年限（In Service Ammunition）內是否皆能發揮其原有效能？

上揭所述，均與彈藥儲存可靠度有高度的相關性（High Correlation），因此，本文導入彈藥儲存可靠度的觀點，由相關文獻探討彈藥儲存期間有關其效能監測的作法，並結合國內實況探究國外對於超量彈藥處理的現



圖一 國軍現階段超量彈藥示意圖（資料來源：作者自行繪製）

- 6 國防部募兵制推動概況專案報告(國防部人力司)，立法院第8屆第1會期外交及國防委員會第8次全體委員會議，民國101年3月22日。
- 7 國防部102年10月1日新聞稿，〈募兵制期程奉行政院核定調整至105年底，政策無改變，亦無跳票情事〉，資料來源：<http://www.mnd.gov.tw/Publish.aspx?cnid=65&p=58841>。
- 8 國防部，《中華民國102年國防報告書：第二篇第四章第一節「兵力整建」》。
- 9 本文引述之兵力員額數量皆為文獻公開資料，而圖一之描繪方式，係因彈藥配賦實際數量仍為國軍機敏參數，不宜以數值直接顯示，故本文採行示意圖表示。

狀，提供國內可行方案建議，期能建立未來國軍彈藥專業標準。

貳、彈藥儲存可靠度

一、可靠度的基本概念

「儲存可靠度」是指在產品的全壽命週期 (Total Life Cycle, TLC) 內，為確保並提高產品的儲存可靠性而發展出之各項工程活動的理論與技術。對彈藥這種特殊產品，發展儲存可靠度之研究，完善儲存可靠度工程之理論及方法，不僅有利於提高國軍在研製新型彈藥之可靠度，亦能從根本上解決彈藥的久儲性問題，並且還可確定或延長現役彈藥的儲存壽期。

可靠度，依國外著名後勤工程學者 Blanchard 之定義為：「元件或系統於預定的操作時間內，在特定的工作與環境條件下，執行特定性能或功能，可以達成任務的能力或機率」¹⁰。

進行可靠度分析時，常以時間、距離、反覆次數、操作次數等因素，作為其參考指標，一般常用時間序列來描述可靠度。與可靠度相對之定義為「失效 (Failure)」機率，表示系統、組件或元件發生故障、損壞，無法發揮預定的功能而暫停或終止；則依此描述，可將

失效機率定義如下¹¹：

$$F(t) = P(\tau \leq t), t \geq 0 \quad (1)$$

(1)式中， τ 代表失效時間 t 之隨機變數， $F(t)$ 則表示在 t 時間內發生失效的機率函數， P 表示機率 (Probability)；另，依Blanchard定義之可靠度，可表示系統在到達 t 時間前未發生失效的機率，以 $R(t)$ 表示；則失效機率 $F(t)$ 與可靠度 $R(t)$ 之關係式可表示為：

$$R(t) = 1 - F(t) = P(\tau \geq t) \quad (2)$$

若考慮到某一時間範圍 $[t, t+\Delta t]$ 內，平均分布到每一個單位時間內的失效機率，稱之為「失效率 (Failure Rate)」，有時也稱為風險函數，其條件為在時間到 t 之前尚未故障；則該函數在離散時的定義，可表示為：

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \times \Delta t} \quad (3)$$

若以連續的時間觀念來看，(3)式之定義需修改為「瞬間失效率 (Instantaneous Failure Rate)」或「故障率 (Hazard Rate) 函數，定義為 $h(t)$ 」，則其函數型式可表示為：

10 Benjamin S. Blanchard, Logistics engineering and management, 6th Edition, Prentice Hall, 2003.

11 同註10。



$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \times \Delta t} = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} \quad (4)$$

為瞭解失效發生之時間點的分布，定義失效機率密度函數為 $f(t)$ ，而其與各函數間之間的關係可分別表示如後：

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^\infty f(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = h(t)R(t) \quad (7)$$

實務上，平均壽命是一個常用來分析系統可靠度的重要指標。若系統無法進行修復，其平均壽命可定義為「平均失效發生時間 (Mean Time To Failure, MTTF)」；若系統可進行修復，其平均壽命則定義為「平均失效間隔時間 (Mean Time Between Failure, MTBF)」，數學模式表示如下¹²：

$$\begin{aligned} \text{MTTF}(\text{MTBF}) &= \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = -\int_0^\infty t \frac{dR(t)}{dt} dt \\ &= -\int_1^0 t dR = -tR \Big|_0^\infty + \int_0^\infty R(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \end{aligned} \quad (8)$$

在可靠度的分析中，失效率（以 λ 表示）為時間函數，常用的可靠度分析模型包括指數分布 (Exponential Distribution)、韋伯分布 (Weibull Distribution) 以及極值分布 (Extreme Value Distribution) 等¹³，其中，以韋伯分布模型適用範圍最廣。

若將彈藥視為一個系統，由彈頭引信、彈體（內裝高爆火藥如TNT、RDX等）以及推進組成（彈底底火、點火筒、發射藥等）等次系統所構成，依「美軍軍規標準 (MIL-STD-756B, Reliability Modeling and Prediction)」¹⁴，則上述三種可靠度分析模型，分別表示如後：

(一) 指數分布

指數分布是失效率 λ 對時間成一定值的分布型態，可以用來表示獨立隨機事件發生的時間間隔，此模型之機率密度函數、可靠度函數與失效率函數可表示為：

12 同註10。

13 Singiresu, S. Rao., Reliability-Based Design. McGraw-Hill, N.Y, 1993.

14 MIL-STD-756B, Reliability Modeling and Prediction. U.S. Department of Defense, Washington, DC., 1981.

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} \quad (9)$$

$$R(t) = e^{-t/\theta} \quad (10)$$

上兩式中， θ 為平均壽命，在指數分配型態下，平均壽命 (θ) 等同於平均失效間隔時間 (MTBF)，因此，

$$R(t) = e^{-t/M} = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

(11)式中之 λ 為失效率， M 為平均失效間隔時間 (MTBF)。

(二) 韋伯分布

韋伯分布是選擇適當的形狀參數 β ，並依 β 值的不同，決定產品的壽命是屬於初期故障期、偶發故障期或是磨耗故障期，則決定故障型態分布的重要因素，即為形狀參數 β 。一般而言，工程實務上多以「韋伯雙參數 (β, η) 之累積分布函數 (Weibull Cumulative Distribution Function, CDF)」，來描述產品 (或系統) 的失效型態，定義為：「系統至某時刻為止發生故障之機率」，表示如下：

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^m} \quad (12)$$

(12)式中之 η 為尺度參數 (Scale Parameter)， m 為形狀參數 (Shape Parameter)。

(三) 極值分布

韋伯分布可視為很多機率變數最小值的漸近分布，則韋伯分布之極值分布型態，相當符合實際產品的故障現象及數據，表示如下：

$$F(t) = 1 - e^{-(t-\mu)/\sigma} \quad (13)$$

(13)式中之 μ 為位置參數，與樣本平均值有關； σ 為尺度參數，且 $\sigma > 0$ 。

基於上述模型，本文將於第四節中，提出對於國軍傳統彈藥在長期儲存環境下可靠度評估模式之研究方法；以下，先行略述世界各國對彈藥可靠度的研究概況，以及美軍準則對彈藥可靠度的實施作法。

二、各國研究概況

世界各國關於彈藥可靠度的研究頗眾，但值得一提的是，中共近年在提升建軍質量的努力上，針對彈藥可靠度的基礎理論與實證研究方面，數量堪稱各國之冠；值得吾人借鑒省思。本文摘列出近年中共與其他國家的研究現況，如表一所示。

綜觀各國研究現況，相較之下，我國對於彈藥可靠度的研究幾乎付之闕如，此與長期以來國軍決策階層不重視彈藥基礎研究有因果關係，像是國軍僅重視演訓成績，卻將射擊成效不彰的原因，一味歸責於彈藥存管單位，實屬倒果為因的作法；除使彈藥存管單位



表一 各國彈藥可靠度研究現況

國家	研究項目(作者、年代、題目、出處a)	內容摘要
中國	郝冲、許路鐵、呂帥(2012)。加速壽命試驗技術在彈藥貯存可靠性工程中的應用。《裝備環境工程》，第9卷第5期，頁48-51。	加速壽命試驗指出，失效機理、資料統計分析與實驗結果驗證，是彈藥儲存可靠度工程之應用中，待優化解決的三個問題。
中國	Jian Wang(王健), Guang Rong(容廣), De Wu Huang(黃得吾), (2012). Reliability Index Assignment and Application of Small-Caliber Ammunition. <i>Advanced Materials Research</i> , Vols. 490-495, pp.490-494.	依小口徑彈藥之特性，引介可靠性指標分配之適用性。
中國	王曉方(2011)。基於可靠性強化試驗的彈藥儲存性失效分析。《荷澤學院學報》，第33卷第2期，頁61-64。	將可靠性強化試驗技術應用於彈藥儲存性設計，研究指出，彈藥之電子部件、機械部件在強化應力下的失效與儲存失效性，其機制和模式上具有一致性。
中國	徐向國、趙曉利(2007)。RCM在彈藥維修分析中的應用。《科學技術與工程》，第7卷第13期。	「以可靠度為中心之維修 (Reliability Centered Maintenance, RCM)」理論，應用於彈藥維修工作上，分析導出彈藥維修之具體步驟。
中國	鄭波、張國、安李明(2003)。自然貯存環境下彈藥系統貯存可靠性評估。《質量與可靠性》，2003年第3期，頁22-25。	針對彈藥在自然儲存環境下的失效特點，研究建立彈藥系統性儲存之可靠度統計分析方法；依據彈藥各部件(子系統)的可靠度試驗資料，評估彈藥系統可靠性並探討在一定信心水準下之可靠儲存壽期。
中國	李良春、王紅衛、譚志強 (2002)。影響海島部隊彈藥儲存可靠性的誘因。《包裝工程》，第23卷第6期，頁68-70。	系統性地分析海島部隊環境特性，詳實闡述影響海島彈藥儲存可靠性的誘因，確認濕度、氧氣、鹽份、腐蝕性氣體，是引起海島部隊彈藥儲存可靠度下降的主要原因。
韓國	Chan Sik Jung, So Young Sohn., (2010). Investigating the relationship between ammunition stockpile information and subsequent performance. <i>Reliability Engineering and System Safety</i> , Vol. 95, pp.426-430.	彈藥可靠度隨儲存時間而改變，利用「典型相關分析方法 (Canonical Correlation Analysis)」蒐集長期儲存資訊後進行統計分析。
美國	DoD, (2005). <u>Defense Science Board Task Force on Munitions System Reliability</u> . Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics Washington, D.C.	過去在有限的測試環境下，無法提供彈藥處於真實環境之相關資訊，現今以可靠度模型模擬多元環境下(地形、天候、擊發或啟動條件)驗證彈藥原始設計之性能。
美國	Bailey Michael P., Bartoli Marcelo., Callahan Alexander J., Kang Keebom., (1992). <u>Establishing reliability goals for naval major caliber ammunition</u> . Monterey, California : Naval Postgraduate School.	以可靠度模型建立彈藥支援火炮武器系統之性能參數，提供指揮者下達決策，確保艦存彈藥能有效地執行任務。
挪威 ^b	Colin King, Ove Dullum, & Grethe Østern ., (2007). <u>M85: An analysis of reliability</u> . Norwegian People's Aid.	M85式群子彈(bomblet, 亦譯為「集束彈」)之功能及失效率分析、可靠度之測試及驗證報告；並分析人員(民眾)誤觸未爆之M85式群子彈時可能產生的傷害。
瑞士	Adrian Wilkinson., (2008). <u>Conventional Ammunition in Surplus, chapter 6, Stockpile Management: Surveillance and Proof</u> . Small Arms Survey Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, Switzerland.	為Conventional Ammunition in Surplus一書中之第6章內容，以可靠度為系統性之方法，於彈藥壽期內評估並監測其儲存安全與效能。

註：a.依APA書寫格式，期刊名稱以斜體表示，書籍或報告則於其下標註橫線

b. Norwegian People's Aid，中文名稱「挪威人道救援組織」，為國際非政府組織(NGO)

c.資料來源：本研究整理

每逢演訓必疲於奔命至各參演單位檢查彈藥之外，對於彈藥管理工作並無實質助益。惡性循環的結果，國內具研究能量的單位(例如：中科院、軍備局、國防大學理工學院等)亦缺乏研究誘因，因為國軍只重演訓成績的表象而不重視彈藥性能基礎研究(諸如：可靠度之測試與評估)的文化環境，驅使研究單位亦只能往「科技先導、資電優勢」的方面發展¹⁵，殊為可惜，更遑論藉此可健全軍備全壽期管理制度，無異緣木求魚。

三、美軍彈藥儲存可靠度方案

鑒於我國施行募兵制之後，兵員人數將大幅縮減，未來勢將衝擊國軍整體後勤作為；而彈藥為發揚戰場火力之基本元素，如何在需用的時候發揮其應有功效，則現行美軍準則中對彈藥儲存可靠度的規範，或可作為國軍未來研擬相關作法時之參考。

美軍為建構其從「搖籃到墳墓(Cradle

to Grave)¹⁶」之彈藥管理責任目標¹⁷，於2009年出版《彈藥儲存可靠度方案(Ammunition Stockpile Reliability Program, ASRP)》規程¹⁸，適用範圍及於傳統砲兵彈藥與化學彈藥、小型與大型火箭、導引飛彈以及相關第五類之軍品物資；成為美軍彈藥可靠度管理之作業指南。該規程主要區分為「彈藥品質管制方案(Ammunition Surveillance Program)¹⁹」、「研究、發展、測試及評估(Research, Development, Test, and Evaluation)」、「功能測試方案(Stockpile Function Test Program)」以及「實驗室測試方案(Stockpile Laboratory Test Program)」等四個主要項目，茲簡要略述於後。

(一) 彈藥品質管制方案(Ammunition Surveillance Program)

此方案主要依據美軍規程AR 740-1《儲存與補給作業要項(Storage and Supply

15 國防部，《中華民國102年國防報告書：第三篇第六章第三節「軍備整備」》。

16 產品生命週期的另一種說法，指產品從設計、生產製造、使用直至報廢的整個週期；現今對於產品生命週期已逐漸朝向「從搖籃到搖籃(Cradle to Cradle)」的觀念發展，亦即，產品設計階段就應構思其結局，讓廢棄產品成為另一個循環的開始。

17 Department of the Army Regulation 702-6, Ammunition Stockpile Reliability Program, Headquarters Department of the Army Washington, DC., 23 June 2009.

18 同註17。

19 Surveillance，單字解釋為偵查、監視，國軍大部分單位將之譯為監察或偵監；依民國92年版之《國軍簡明美華軍語辭典》中，Quality Surveillance一詞為「品質管制」之意，按該《彈藥儲存可靠度方案(Ammunition Stockpile Reliability Program, ASRP)》內容，此處將Surveillance譯為「品質管制」較為妥適。



Activity Operations)》²⁰與美軍補給公報 SB 742-1《彈藥品質管制程序(Ammunition Surveillance Procedures)》²¹進行，其中，最重要的則是依照SB 742-1執行彈藥檢查工作。然而，與美軍不同的是，我國僅將彈藥檢查週期區分為W(4年)、X(3年)、Y(2年)、Z(1年)等四個週期，而SB 742-1則區分為R(10年)、S(9年)、T(8年)、U(7年)、V(6年)、W(5年)、X(4年)、Y(3年)、Z(2年)等九個週期；此外，對於檢查批量之允收準據，規範相當嚴格。相較之下，國軍現階段彈庫人力以及未來募兵制體系下之兵力規模，若依照美軍規範制度施行，確實存在力有未逮之憾，因而，必須找出適於我國國情之彈藥檢查方式，以符維持彈藥品質管制之需求。

(二) 研究、發展、測試及評估(Research, Development, Test, and Evaluation)

此項方案主要是導入全壽期的管理觀念，聚焦於彈藥產品在設計、研發階段，相關元件壽期限制的關鍵因素為何，藉由可靠度測試方法改善產品的缺陷並預測產品的儲存壽期。

(三) 功能測試方案(Stockpile Function Test Program)

功能測試方案主要在驗證彈藥儲存期

間，彈藥是否仍維持其原有設計之效能；區分四個功能測試型態，如後：

1. 於專業彈藥測試場執行功能測試：由生產製造商就彈藥存放區域及該區域氣候條件，抽樣進行測試，蒐集數據作為可靠度之評估依據。
2. 於國有民營設施執行功能測試：例如，從米蘭陸軍彈藥工廠(Milan Army Ammunition Plant)或愛荷華陸軍彈藥工廠(Iowa Army Ammunition Plant)等場地，依SB 742-1規範進行抽樣測試，測試數據作為可靠度之評估依據。
3. 於訓練時機執行功能測試：在年度軍種火炮作業時(含大型火箭與導引飛彈之射擊演習)，蒐集功能數據(失效情形)作為可靠度之評估依據。
4. 特殊功能測試：適用於特殊情況，例如：儲存期間已發現有特定的衰退(劣化)部位；或是必須修正、建立某些現存品項之儲存壽限時，例如：延壽儲存。

過去，我國曾於彈藥整修後會執行效能試射，但鑒於民情反映以及效能試射場地多借用靶場實施，安全措施難以全般掌握，現今經過整修之彈藥已無效能試射的程序。此外，自政府解嚴之後，國內環保意識高漲以及

20 Department of the Army Regulation 740-1, Storage and Supply Activity Operations, Headquarters Department of the Army Washington, DC., 26 August 2008.

21 Department of the Army Supply Bulletin 742-1, Ammunition Surveillance Procedures, Headquarters Department of the Army Washington, DC., 1 September 2008.

國、內外政治環境下的約束，國軍幾已無實兵實彈對抗演習的機會，軍種年度實彈射擊的次數亦寥寥可數，欲仿效美軍藉由演訓時機蒐集彈藥功能數據進行可靠度研析，幾已成為不可能的任務。

(四) 實驗室測試方案 (Stockpile Laboratory Test Program)

此方案的目的，主要藉由實驗室對彈藥進行破壞性或非壞性的實驗，提供回饋的資訊，以改善彈藥設計與研發階段的相關問題。實驗室測試可由獨立性專業單位或隸屬軍種的實驗室實施，針對彈藥成份中的毒性物質、或發射藥的安定性、或是彈藥的電子及機械部位，像是引信及發火機構等；其他像是密封膠、潤滑劑(例如：充填於大彈頭引信塞之錫化黃油)、黏著劑與彈體塗層之實驗分析，均可依實驗資料作為可靠度的評估數據。

四、國軍傳統彈藥長期儲存可靠度評估模式之建構

綜前所述，建立彈藥可靠度模型，可以協助瞭解並判斷彈藥在儲存期間是否仍能維持其原有效能，亦或已達失效狀態，必須加以整修(更換元件，例如：引信、底火機構、發射藥等)或汰除。

參考美軍《彈藥儲存可靠度方案(Ammunition Stockpile Reliability Program,

ASRP)》規程中有關彈藥品質管制的論點，考量國軍目前彈藥檢查的作法並非完全依循美軍SB 742-1的程序，復考量募兵制體系下，彈藥存管單位的兵員人力勢將無能力於每年進行完整的週期檢查，亦無完整能量執行功能測試或實驗室測試；因此，本文基於學理研究並參酌相關文獻後，建構提出國軍傳統彈藥長期儲存之可靠度評估模式，俾提供國軍彈藥單位未來在彈藥效能的監控上，能據以訂定出妥適可行的作法。

彈藥不同於其他武器系統與裝備，在其壽命週期的橫斷面中，儲存時期佔其壽期的絕大部分時間。一般彈藥的可靠儲存壽命指標為10~25年^{22,23}，若依照自然環境儲存、長期監測以及資料統計等傳統的壽命試驗方法，對經過長期儲存的彈藥進行壽命預測，在短時間內很難獲取可信的壽期可靠度資訊，甚至往往試驗還未完成，而此種彈藥產品已被淘汰。換句話說，募兵制體系下的彈藥存管單位人力，是無法進行大規模的長期監測作為，而必須藉助科學性的實驗方式，協助獲得彈藥可靠度評估所需的數據資料；這些實驗可交由具能量的單位，例如中科院或國防大學理工學院，以抽樣實驗的方式進行。

加速壽命試驗(Accelerate Life Test, ALT)方法，是在不改變產品失效機制之前提

22 阮望聖，《炸藥理論與實務》(高雄：聯勤203廠，西元1986年)，頁1-3。

23 歐育湘，《炸藥學》(北京：北京理工大學出版社，西元2006年)，頁6-8。



下，用加大應力水準的方式所進行之壽期試驗，因其可在較短的時間內評估產品在正常條件下之儲存可靠度或壽期指標，因而在產品可靠度的驗證中獲得廣泛的應用^{24,25}。

加速壽命試驗應用在彈藥效能的測試上，近年已廣為研究者所採用^{26,27}，而聯合國2011年出版之「國際彈藥技術指南(International Ammunition Technical Guideline)」²⁸，亦將加速老化試驗(Accelerated Aging Tests)列為監測彈藥效能必須執行測定的項目之一。

本文提出之加速壽命實驗構想，係自國軍各彈庫所屯儲各種口徑之傳統批號彈藥，依美軍軍規標準MIL-STD-105E實施隨機抽樣，區分儲存期間為5年內、6~10年、11~15年、16~20年以及21年以上等時間間隔，實施抽樣樣品之加速壽命實驗。

(一) 彈藥可靠度基本模式探討

當從一定批量的儲存現品中抽取一些樣品(n 個)作試驗，若測試判斷為失效後，可得

數據 (t, n, r) ，其中， t 為儲存年限、 n 為試驗樣本數、 r 為失效數；此數據之特徵為：

1. r 為 t 時間內發現之已失效數量，而在 $(0, t)$ 時間內，彈藥究竟其在何時失效則是未知的。
2. 未失效數 $(n-r)$ 為測試 t 時間內之未發生失效的數量，然而，定義彈藥儲存壽期 T ，則彈藥儲存壽期究竟可以有多長則是未知[亦即，在 $(n-r)$ 中之 $T > t$ 係未知]。
3. 當 $r=0$ 時(無失效情形時)，則彈藥壽期有多長亦為未知。

對上述數據如何處理，才能得到較為符合實際的彈藥壽期分布規則或函數，是一較為複雜的統計學問題；因此，本文導入存活分析(Survival Analysis, 或稱「殘存分析」)概念，以「設限資料(Censored Data)」與「最大似然方法(The Maximum Likelihood Method)」，建立國軍彈藥長期儲存可靠度之評估模式。

24 張春華、溫熙森、陳循，〈加速壽命試驗技術綜述〉《兵工學報》，第25卷第4期，西元2006年，頁485-490。

25 Frank Proschan, Nozer D. Singpurwalla., A New Approach to Inference from Accelerated Life Tests. "Transactions of Reliability", Vol.29, No.2 (1980), pp.98-102.

26 Zhou, K., Luo, T. Y., & Zhang, L. W., Prediction Techniques for Storage Life of Missiles. "Metal Forming", Vol.2 (2005), pp.6-11.

27 Luo, T. Y., Zhou, K., Yu, S. H., & Zhu, L., Summarization on Foreign Ammunition Storage Life Test and Evaluation Technology. "Metal Forming", Vol. 4(2005), pp.17-22.

28 UN., (2011), International Ammunition Technical Guidelines, United Nations Office for Disarmament Affairs. <http://www.un.org/disarmament/un-safeguard/guide-lines/>.

事實上，在大部分所取得欲研究的群體樣本中，因為資料蒐集以及觀察時間上的落差，並非所有樣本都能觀察到完整的存活時間，例如，一種情況是在觀察活動完畢後，有些樣本仍然存活，研究者無法掌握其後續狀態，這些不完整樣本資料，稱為「設限資料 (Censored Data)」，反之，能被充分瞭解其存活過程的資料，即稱為「非受限資料 (Uncensored Data)」或「完整資料 (Complete Data)」。

何謂「設限」？當進行觀測或實驗時，若某一產品的確切壽期未知，僅知其壽期大於一個定值 L ，則稱該產品的壽期在 L 是右設限的， L 為右設限資料；若僅知壽期小於 L ，則稱該產品的壽期在 L 是左設限的， L 為左設限資料；習慣上以 $L+$ 表示右設限資料， L 表示左設限資料；通常，右設限情況較為常見，左設限情況則相對較少^{29,30}。

一般而言，存活分析最普遍使用之方法，是將失效數據利用假設之壽命模型（即利用觀測或實驗數據，允許有左設限、右設限以及區間型設限資料），以最大似然估計法 (Maximum Likelihood Estimation, MLE³¹) 估算其參數。

假設產品壽命 X 的分布函數是 $F(X, \theta)$ ，對 n 個樣品進行觀測，則一般情況下可得對應之似然函數，通常取為如下型式³²：

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^{n_1} f(t_i, \theta) \cdot \prod_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} [1 - f(t_i, \theta)] \cdot \prod_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} f(t_i, \theta) \cdot \prod_{i=n_1+n_2+n_3+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4} [F(t_i^{(2)}, \theta) - F(t_i^{(1)}, \theta)] \quad (14)$$

(14) 式為一般情形下之似然函數，對彈藥這種產品的估算，尚必須找到彈藥的儲存壽期分布函數，再利用 (14) 式進行參數估算。

(二) 彈藥產品之儲存壽期分布函數

依前揭所述，本文定義國軍傳統彈藥儲存壽期共三種型態之分布函數，如下：

1. 指數分布

29 Fisher, Ronald A., Statistical methods for research workers, "In Breakthroughs in Statistics", Springer New York, 1970, pp. 66-70.

30 Meeker, W. Q., & Escobar, L. A., "Statistical methods for reliability data", Vol. 314(1998), John Wiley & Sons.

31 I. J. Myung, Tutorial on maximum likelihood estimation, "Journal of Mathematical Psychology", vol. 47(2003), pp.90-100.

32 陳家鼎，《生存分析與可靠性引論》(中國：安徽教育出版社，西元1993年)。



對含有電子元件（例如：彈頭配賦近炸引信、尋標器，或擊發機制為電子引控之火箭彈等）之彈藥，歸類於指數分布型態，則

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (15)$$

(15)式中之 λ 為失效率。

2. 韋伯分布

對不含電子元件之彈藥（例如：彈頭配賦機械引信，彈底為傳統式底火擊發裝置等），歸類於韋伯分布型態，則

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^m} \quad (16)$$

(16)式中之 m 為形狀參數， $m > 0$ ；為尺度參數， $\eta > 0$ 。

3. 極小值分布

對不含電子元件之彈藥另件，例如機械引信、點火筒、發射藥，以及構造簡單之彈藥，如手榴彈、信號彈等，歸類於極小值分布型態，則

$$F(t) = 1 - e^{-(t-\mu)/\sigma} \quad (17)$$

(17) 式中之 μ 為位置參數， σ 為尺度參數， $\sigma > 0$ 。

(三) 加速壽命實驗數據之似然函數

經由加速壽命實驗所得之數據，概可區分兩種情形，如下：

1. 儲存期間在5年以內之彈藥，若加速壽命實驗中有發生失效的狀況時，即可判定已得此彈藥之壽終數據，同時，實驗數據中存在左限資料與右限資料，亦即，當得到 k 組數據 (t_i, n_i, r_i) ($i=1, 2, 3, \dots, k$) 且 $t_1=1$ 時，有壽終數據 (r_1) ($r_1 \neq 0$) 個，則此時之似然函數可表示如下：

$$L(\theta) = f(t_1, \theta)^{r_1} [1 - F(t_1, \theta)]^{n_1 - r_1} \cdot \prod_{i=2}^k [1 - F(t_i, \theta)]^{n_i - r_i} [F(t_i, \theta)]^{r_i} \quad (18)$$



2. 另一種情形則是進行加速壽命實驗後並無失效的狀況時 ($r_i=0$)，亦即，無壽終數據，實驗數據中僅有左限資料與右限資料，則此時之似然函數可表示如下：

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^k [1 - F(t_i, \theta)]^{n_i - r_i} [F(t_i, \theta)]^{r_i} \quad (19)$$

(四) 彈藥壽期分布函數之參數計算

當確定各式彈藥之壽期部分與實驗數據之似然函數後，即可對壽期分布函數之參數進行最大似然計算，步驟如下：

1. 將(15)～(17)式分別代入(18)或(19)式中，再兩邊取對數
2. 將所得之對數函數式對參數 θ 進行偏微分， $\partial \ln L(\theta) / \partial \theta = 0$ ，可得似然方程式或方程組，即，對指數分布型態可得一似然方程式，對韋伯分布以及極值分布可得一似然方程組。
3. 以「擬牛頓法(Quasi-Newton Methods)³³」求解似然方程式或似然方程組，可得壽期分布函數中參數之最大似然估計值。

(五) 彈藥儲存可靠度計算

本文定義彈藥儲存可靠度之數學表示

式，如下：

$$R_s(t) = R_0 R(t) \quad (20)$$

(20)式中之 $R_s(t)$ 表示儲存可靠度， R_0 表示固有可靠度， $R(t)$ 為某條件下之儲存可靠度，以 $R(t)=1-F(t)$ 表示。

R_0 可由生產出廠彈藥新品之驗收數據得到， $R(t)$ 則由儲存至某一時期之測試數據得出（由加速壽命實驗數據計算而得），此式，可真正反映儲存環境條件對彈藥效能的影響。

(六) 無壽終數據之最大似然函數估算

在彈藥儲存可靠度之加速壽命試驗中，預判有些情況下可能會得不出壽終數據，這是因為彈藥的內裝炸藥如TNT、RDX、B炸藥等皆為相當穩定之化學物質，若非處於極端環境下（惡劣天候如潮濕、多雨等，極端地形如高原、冰覆地區等），則這些內裝炸藥可穩定儲存約35年左右³⁵。

此時，可用(19)式進行最大似然估算；但各式彈藥之壽期分布函數不同，似然估算的方程組也不同。若某型式彈藥的儲存壽期分布函數為兩參數韋伯分布時，將(16)式代入(19)式，兩邊取對數，可得：

33 Dennis, J. E., and More, J. J., Quasi-Newton methods, matiration and theory, "SIAM Review", Vol.19(1977), pp.46-89.

34 More, J. J., and Cosnard, M. Y., Numerical solution of nonlinear equations, "ACM Trans. Math. Software", Vol.5(1979), pp.64-85.

35 同註20。



$$\ln L(m, \eta) = \sum_{i=1}^k \left[r_i \ln(1 - e^{-(t_i/\eta)^m}) - (n_i - r_i) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \right] \quad (21)$$

令 $\frac{\partial \ln L(m, \eta)}{\partial m} = 0$, $\frac{\partial \ln L(m, \eta)}{\partial \eta} = 0$; 可得以下聯立方程式, 如下:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^k \left(\frac{r_i}{1 - e^{-(t_i/\eta)^m}} - n_i \right) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m &= 0 \\ \sum_{i=1}^k \left(\frac{r_i}{1 - e^{-(t_i/\eta)^m}} - n_i \right) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^m \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

(22) 式中, 只要 $t_1, \dots, t_k$ 不全相等, 則該方程組有唯一解 $\hat{m}$ 與 $\hat{\eta}$, 即為參數 m 與 η 的最大似然估計值, 之後, 與 (20) 式合併, 進行可靠度之計算。

(七) 有壽終數據之最大似然函數估算

在彈藥儲存可靠度之加速壽命試驗中, 得出壽終數據時, 採用 (18) 式進行最大似然估計; 若某型式彈藥的儲存壽期分布函數為單參數指數分布時, 其機率密度分布函數為 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, 將 (15) 式代入 (18) 式, 可得似然函數, 如下:

$$L(\lambda) = (\lambda e^{-\lambda t_1})^{r_1} (e^{-\lambda t_1})^{n_1 - r_1} \cdot \prod_{i=2}^k (e^{-\lambda t_i})^{n_i - r_i} (1 - e^{-\lambda t_i})^{r_i}$$

$$\ln L(\lambda) = r_1 \ln \lambda - n_1 \lambda + \sum_{i=2}^k \left[r_i \ln(1 - e^{-\lambda t_i}) - (n_i - r_i) (\lambda t_i) \right] \quad (23)$$

令 $\frac{\partial \ln L(\lambda)}{\partial \lambda} = 0$, 可得

$$\frac{r_1}{\lambda} - n_1 + \sum_{i=2}^k \left(\frac{r_i}{1 - e^{-\lambda t_i}} - n_i \right) t_i = 0 \quad (24)$$

(24) 式中, 只要 $t_1, \dots, t_k$ 不全相等, 則該方程組有唯一解 $\hat{\lambda}$, 即為參數 λ 的最大似然估計值, 之後, 與 (20) 式合併, 進行可靠度之計算。

(八) 模擬情境試算

本文先行模擬一假設情境, 以驗證本文所建構之可靠度評估模型, 在實際運算上是否可行。

假設自國軍北部地區某彈庫隨機抽樣六六公厘火箭彈, 進行儲存可靠度評估, 經加速壽



命實驗後，獲得實驗數據，如表二所示。

將表二中之數據，代入第(22)式，以「擬牛頓法(Quasi-Newton Methods)」使用Broyden's Method寫入Mathematics軟體內^{36,37}，經計算後（求解精確至小數點後第7位數），求得參數

$$\hat{m} = 1.2111858$$

$$\hat{\eta} = 123.3201893$$

將上述參數值代入第(16)式後，通常將出廠彈藥新品之固有可靠度 R_0 視為1（即，固有可靠度100%），則利用第(20)式可計算出條件可靠度 $R(t)$ ，如表三所示。

表三所顯示之意義，表示六六公厘火箭彈儲存第1年期間之可靠度為0.9971(99.71%)，亦即，六六公厘火箭彈能完成任務之機率為99.71%，失效率僅為0.29%。

由表三可知，六六公厘火箭彈儲存至第30年時，可靠度為0.8349(83.49%)，表示有16.51%的機率會發生失效情形。這種資訊能提供給彈藥存管單位作出決策，例如，若撥交給部隊已庫儲20年的六六公厘火箭彈，則10發火箭彈中就有約1發的火箭彈會失效(可靠度89.54%，表示失效率為10.46%)，這種會影響到作戰部隊戰力的情形，就必須考量庫儲20年以上的火箭彈是否應該汰除，不應再撥交部隊使用。

經由公式推導與模擬情境驗證，本文所建構之「國軍傳統彈藥長期儲存可靠度評估模式」，具學術理論依據且富高度應用價值，應屬彈藥決策單位未來可採行之管理措施。尤其，國軍彈藥單位現階段僅依賴彈藥檢查方式評斷彈藥是否堪用，並不足以監控庫儲

表二 六六公厘火箭彈加速壽命實驗數據表(模擬情境)

抽樣編號	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
儲存年限	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15
實驗數	90	39	20	20	50	350	430	530	250	259	60	190
失效數	0	1	0	0	2	11	17	33	15	10	4	12

資料來源：本研究整理

表三 條件儲存可靠度

t(年)	1	5	10	15	20	25	30
R(t)	0.9971	0.9796	0.9534	0.9250	0.8954	0.8653	0.8349

資料來源：本研究整理

36 Broyden's Method是現代工程中常用以求解非線性聯立方程中較為簡潔快速的方法，是由學者Broyden於1969年所推導出解決數值迭代法處理非線性聯立方程組問題所建立之理論方法。

37 Mathematics軟體，目前市售套裝數學軟體，軟體官方網站<http://mathworld.wolfram.com/>。



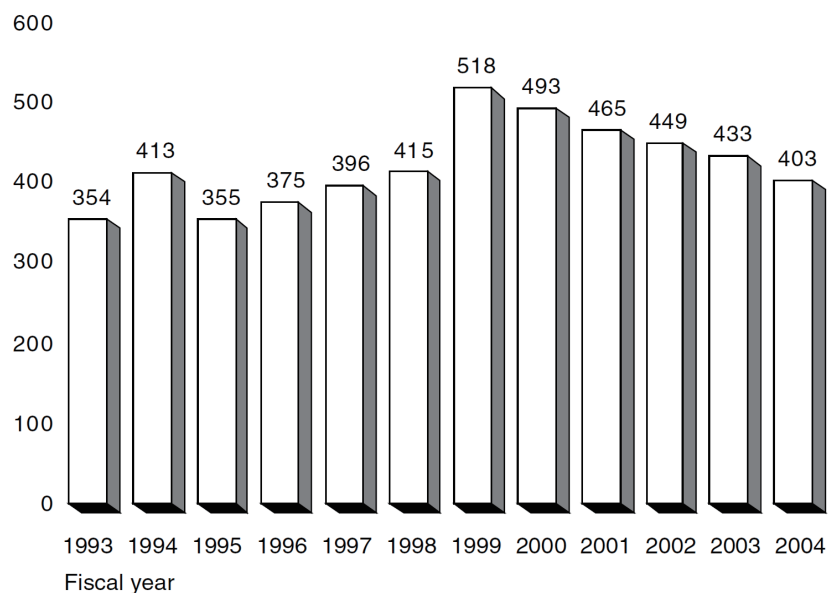
彈藥的效能是否能滿足部隊戰力所需；若依本文所建構之可靠度模式，則可預判多久壽期的彈藥品項應考量列入汰除或不適用彈藥予以汰廢，不僅可減省彈藥檢查人力，同時可提升庫儲管理效率。

參、超量彈藥

超量彈藥的情況，並非我國特有的情形，全世界正都面臨此一棘手的問題。根據美國審計總局（United States General Accounting Office, US GAO）2004年的報告顯示³⁸，產生超量彈藥的背景，來自冷戰時期結束後，美軍兵力結構重整並實施軍備裁減措施，軍種對於傳統彈藥的需求顯著地減少，截至1993年底，積累而等待銷燬的超量彈藥數量已達34萬5000噸；為數龐大的超量彈藥已影響美軍任務的執行，因此，美國國防部設定的目標，是要在

2004年會計年度時將超量彈藥的數量降低至10萬噸。

然而，根據美軍作戰支援司令部提供給美國審計總局的資料則顯示，2001年會計年度累積待處理超量彈藥已達46萬5,000噸（圖二），此係與美軍裁軍有直接關聯；美軍自1990年至1994年間，總兵員從211.7萬人減至165.05萬人，減幅為22%，1995年至2002年，總兵員再減至141.4萬人，減幅為14%；裁減兵員後產生了超出編裝配賦的超量彈藥。



Note: Includes only reported stockpile amounts.

圖二 美軍1993至2004會計年度超量彈藥累積與已銷燬處理之數量圖³⁹
（圖中縱軸單位為「千噸」，2002年後之數據為預判數量）

38 GAO-04-427R Defense Management, Subject: Defense Management: Continuing Questionable Reliance on Commercial Contracts to Demilitarize Excess Ammunition When Unused, Environmentally Friendly Capacity Exists at Government Facilities, United States General Accounting Office Washington, DC 20548.

39 GAO-01-372 Defense Inventory, Subject: Steps the Army Can Take to Improve the Management and Oversight of Excess Ammunition, United States General Accounting Office Washington, DC 20548.

由圖二顯示，美軍1993年累積超量彈藥為35萬4千噸，至1994年時再爆增至41萬3千噸，1995年後，裁軍速度放緩，美國國內之處理能量始能作積極之處置；然而，超量彈藥處理的速度仍趕不上累積的數量，至1999年時超量彈藥累積數量已達51萬8千噸之高峰。經美國審計總局（GAO）稽核後，大致歸納箇中原因，如下：

- 兵力縮減，彈藥需用數減少，庫儲彈藥因消耗量少而持續增加。
- 增加核武力部署，因而減少傳統彈藥需求。
- 材料輕、精準度高、殺傷力強、多用途等之新式彈藥，逐漸取代傳統彈藥，造成傳統彈藥使用率更低而繼續囤儲於庫房中。

● 某些彈藥毫無計畫性的儲備，例如：非自毀性之人員殺傷地雷（Non-Self-Destruct Antipersonnel Land Mines），造成不適用彈藥數量的增加。

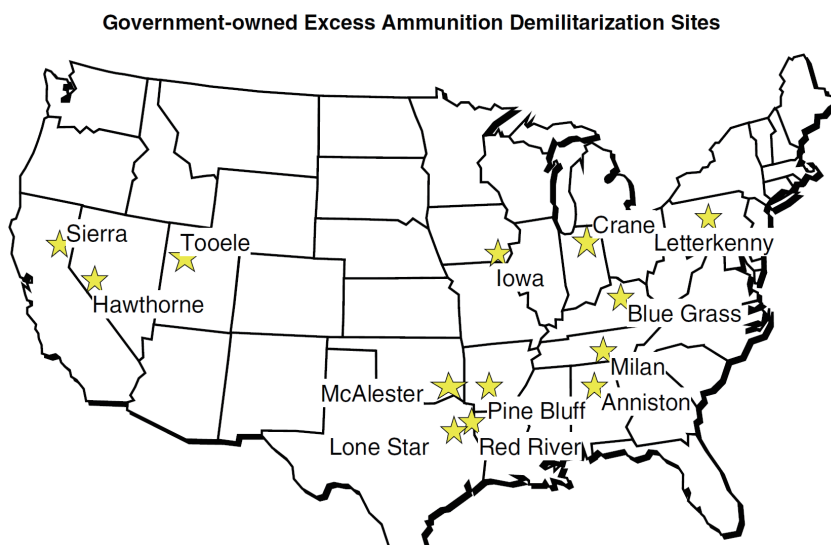
● 輿情壓力下，迫使軍方必須採取環保手段處理彈藥，開放式燒燬、爆燬（Open Burn/Open Detonation, OB/OD）作業量減少，能以環保方式回收再處理彈藥之能量有限，造成超量彈藥之數量始終居高不下。

事實上，美國國內有13家國有民營設施正積極協助美軍處理超量彈藥（圖三），其因應環保處理方式而可復原與再利用之能量共計每年8萬1,100噸（以2001年資料列計），但實際經過復原與再利用處理之彈藥僅1萬6,182噸，佔其可復原與再利用總能量的

20%，處理能量偏低；詳如表四所示。

然而，儘管超量彈藥情況嚴重，但美軍卻仍持續向國防合約商採購彈藥（表五），對於庫儲現況的檢整，顯然美軍亦並未落實，因而遭到審計總局（GAO）的檢討，要求美國國防部正視此情形加以改善。

由表五可見，0.50吋機槍彈、60公厘迫砲彈、105公厘加農彈以及155公厘發



Source: Defense Ammunition Center.

圖三 美國境內處理汰除或超量彈藥之國有民營設施位址

（資料來源同註39）



表四 美國2001年會計年度銷燬計畫中可復原與再利用能量之比較表

處理場地	復原與再利用之能量 (噸)	於銷燬計畫中實施復原與再利用之數量 (噸)	佔處理能量之百分比 (%)
Anniston	1,000	0	0
Blue Grass	4,000	26	1
Crane	3,3001	2,765	21
Hawthorne	13,500	5,725	42
Iowa	5,000	772	15
Letterkenny	1,000	115	12
Lone Star	2,000	1,158	58
Milan	1,800	0	0
McAlester	9,300	4,248	46
Pine Bluff	3,500	0	0
Red River	1,000	0	0
Sierra	24,000	1,099	5
Tooele	1,700	274	16
合計	81,100	16,182	20

資料來源：本研究整理

表五 美國2000年會計年度採購訓練彈藥品項與同時期儲存於待銷燬庫房之同品項彈藥比較表

品項	仍於可用條件下之儲存量	2000年會計年度之採購量
M60式或M73式7.62公厘機槍彈	8,676	27,163,329
0.30吋步槍彈	9,600	16,154
0.45吋手槍彈與半自動機槍彈	20,855	240,413
0.50吋機槍彈	1,083,282	11,100
M2式與M19式60公厘迫砲彈	421,781	9,161
M68式105公厘加農彈	132,456	10,957
155公厘發射藥	428,249	2,951
M228式手榴彈引信	5,020	1,298,064
M18式紅煙手榴彈	1,050	16,067

註 a.本表係由GAO統計分析，儲存資料是由國防彈藥中心（Defense Ammunition Center）提供，採購資料則由作戰支援司令部（Operations Support Command）提供

b.本表未註明項量單位，依本文作者推測，其單位應為「顆（RD）」數，而非「噸」數

c.資料來源：本研究整理



射藥等品項，已屬絕對超量狀態，但美軍仍持續採購，或許美軍有實際作戰任務需求考量，但超量彈藥現況確實是一道難解的問題；而且，處理超量彈藥的經費往往超乎想像。

據美軍2008年另一份資料顯示⁴⁰，2008年估計已累積48萬噸的傳統彈藥、超過40萬噸的飛彈與其飛彈元件等待處理，粗估每噸處理經費為2,200美元，處理完畢將花費約20億美金（\$2 billion）⁴¹；此外，未處理前之屯儲空間也造成美軍的困擾。據同一份文件指出，處理每一噸傳統彈藥，平均約需騰出7~9平方英尺的空間，同時，處理能量也是棘手的問題，美軍統計，自2010~2015年，待處理超量彈藥將累積至55萬噸左右的傳統彈藥以及約50萬噸的飛彈及其元件，每年處理經費將自1億5千萬美金（\$150 million）爆增至每年約需2億零6百萬美元（\$206 million）⁴²。

再者，由於全球環保意識抬頭，過去

美軍習於以開放式燒、爆燬（OB/OD）處理彈藥的方式，亦被要求改以封閉式處理技術（Closed Disposal Technology, CDT），或考量對環境友善的R3技術（Resource Recovery and Recycling）來取代過往的處理方法，無形中，更加遽處理成本的負荷；因此，在控制成本與處理績效上，美軍同樣地面臨兩難的局面。

事實上，全球各地區也正面臨超量彈藥的難題。有研究顯示⁴³，自冷戰時期結束後，各國花了相當大的心力裁減軍備、消弭衝突並維持軍事武力均衡的狀態，但仍有許多國家或地區仍為數量龐大的超量彈藥所苦（表六），大部分中亞地區與東歐國家並沒有足夠的經費與技術來處理超量彈藥問題。

表六顯示這10個國家/地區的超量彈藥總數，已達455萬餘噸之譜，估計其超量彈藥數量應大於此數字。研究指出⁴⁴，超量彈藥問題的指向，將由於缺乏有效的監督與

40 Meg Williams and Trish Bryan, "The Joint Munitions and Lethality Life Cycle Management Command (JM&L LCMC) Provides the Best Capability to U.S. Warfighters," Army AL&T magazine, January-February-March 2008, pp.11, http://asc.army.mil/docs/pubs/alt/2008/1_JanFebMar/full/00_ALT_magazine_Full_Issue_200801.pdf.

41 同註40。其計算方式是以48萬噸的傳統彈藥與40萬噸的飛彈及其元件，取整數90萬噸計算，每噸處理經費2,200美元，共計19億8千萬美元，取整數即約為20億美金。

42 同註40。

43 Adrian Wilkinson, *Conventional Ammunition in Surplus*, chapter 1, Introduction: Conventional Ammunition in Surplus, Small Arms Survey Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, Switzerland, 2008.

44 Adrian Wilkinson, *Conventional Ammunition in Surplus*, chapter 13, Ammunition Depot Explosions, Small Arms Survey Graduate Institute of International and Development Studies, Geneva, Switzerland, 2008.



表六 各國家/地區之超量彈藥數量統計表⁴⁵

國 家	超量彈藥數量
阿富汗 Afghanistan	100,000+
阿爾巴尼亞 Albania	120,000
白俄羅斯 Belarus	1,000,000
波士尼亞與黑賽哥維那 Bosnia and Herzegovina *	67,000
保加利亞 Bulgaria	153,000
伊拉克 Iraq**	400,000
芒特尼格羅 Montenegro ***	11,200
塞爾維亞 Serbia	200,000+
烏克蘭 Ukraine	2,500,000
總計	4,551,200+

* 位於南斯拉夫中西部的地區名稱

** 美軍已自伊拉克戰爭中銷燬超過20萬噸的彈藥

***原屬六個組成南斯拉夫聯邦之一的共和國

資料來源：本研究整理

表七 1995至2007年間已知的彈庫爆炸事件統計表⁴⁶

年代	國家數	爆炸事故數	傷亡情形	
			死亡	受傷
1995 - 2000	11	31	351	636
2001	10	16	80	243
2002	11	16	1,587+*	557
2003	9	21	166	356+
2004	10	16	88**	1,290+***
2005	16	21	159	529+
2006	15	18	11	128
2007	12	14	133+	525+
總計		153	2,575+	4,264+

* 2002年全球11個國家發生16起彈藥爆炸事故，而單在奈及利亞所發生的1起彈藥爆炸事故，即造成1500人員死亡

** 此數字不包括北韓發生爆炸事故未經官方報告確認死亡的1000人

***此數字包括北韓發生爆炸事故後經官方報告確認受傷的1200人

資料來源：本研究整理

45 同註43。

46 同註44。



管理，而在儲存與運輸方面產生不可預期的風險（Risk）。此外，缺乏彈藥品質管制（Surveillance）與檢查（Inspection）的技術，將使超量彈藥處於非可靠且極度不安全的儲存狀態，形成潛在不穩定的風險因素，成為意外事故或爆炸的主要成因；如表七及表八所示。

表八的資料中，我國也被列入其內，但我國的爆炸及死傷數字統計，應是包含了軍備局所屬生產工廠之火工意外事件。無論如何，相關研究資料統計指出⁴⁸，雖然引起彈藥

爆炸意外的成因很多，但對於屯儲超量彈藥的情況，可歸納以下四個成因：

- 一、由於超量彈藥數量龐大，未能相對投注鉅額的金錢、時間、人力進行處理，在未知其彈藥儲存可靠度的情形下，彈藥/火炸藥之物理或化學性質衰變（Deterioration），是導致意外爆炸的主要原因。
- 二、非安全性的儲存作業，將彈藥存放於非安全之設施。
- 三、非安全性的管理與運輸作業。

表八 1995至2007年間各國已知的彈庫爆炸事件統計表⁴⁷

國家	爆炸 事故數	傷亡情形	
		死亡	受傷
阿富汗Afghanistan	16	199	452+
俄羅斯聯邦 Russian Federation	16	35	94
阿爾巴尼亞Albania	16	57	64
伊拉克Iraq	12	131	90
印度India	10	35	67
烏克蘭Ukraine	6	7	17
莫三比克Mozambique	5	115+	464+
中華民國ROC	5	8	2
泰國Thailand	5	21	165
厄瓜多爾Ecuador	4	10	473
哈薩克Kazakhstan	4	0	0
蘇丹Sudan	4	82	260+
總計	103	700+	2,148+

資料來源：本研究整理

47 同註44。

48 同註44。



四、人為的蓄意破壞。

由表六與表八可以理解上述第2~4個成因，根據美軍文件「處理每一噸傳統彈藥，平均約需騰出7~9平方英尺的空間」，則表六與表八所列的非洲、東歐與中亞地區國家，面對超量彈藥的存放處理，在無法取得合格庫房情形下，將就於倉庫或其他簡易場地存儲，採取不嚴謹的搬運作為，或是為了生活任意破壞包裝(木箱、鐵罐)取得資源變賣等，以至於肇生爆炸意外事故，也就不足為奇了。

至今，超量彈藥已成為世界各國面臨難解的課題，絕大多數情形下，銷燬處理並非最佳、也非最終解決方案⁴⁹。

美國審計總局對美國國防部所提出的建議措施，除了要求國防部在成本效益的考量下，結合公私部門(Public/Private Sector)的能量，善用民間與政府設施積極銷燬超量彈藥；同時也要求國防部進一步分析，基於訓練目的之考量，是否可自超量彈藥中撥交可用的部分，供作訓練使用⁵⁰。

事實上，從超量彈藥中檢整可用彈藥，即與本文前段所強調的彈藥儲存可靠度之關係是密不可分的。

肆、未來精進國軍彈藥管理工作芻議

我國超量彈藥的情形亦相當嚴重，與其他國家來自冷戰時期的遺緒不同，我國超量彈藥產生的歷史背景，主要是不同階段的組織人員精實措施下，並未即時相應的汰除過剩彈藥，隨著時空環境變遷，實彈射擊與演訓的時機愈益減少，導致大量彈藥隨儲存時間推移而無消耗的需求，演變至今，愈發成為難以解決的沉痾。

因應未來國軍募兵制體系下兵力員額縮減，彈藥管理單位如何利用有限資源以獲取最大管理效益，是一必須嚴肅面對的課題。本文由彈藥儲存可靠度的觀點切入，提供幾點建議，如後：

一、募兵制期程已奉行政院核定調整至105年底實施，在此之前，國軍應先進行全面的彈藥儲存可靠度評估作業。依本文所建構之彈藥長期儲存可靠度評估模式，自全國各地區彈庫中抽樣，委由中科院、軍備局或國防大學理工學院實施加速壽命實驗，蒐集數據後計算出每一類型彈藥在儲存至某一時期之失效率，據此，建立起完整的彈藥儲存可靠度資料庫。

二、繼之，國軍決策單位應依我國《國防報告書》與《四年期國防總檢討》，針對當前我國防衛作戰環境訂定出合理的彈藥配賦需求，意即，必須依募兵制體

49 同註43。

50 同註38。

系下的兵力員額訂定彈藥基本攜行量與戰備存量之基準，如此，始能在滿足募兵制編裝配賦的情形下，檢討真正超量彈藥的數量。

三、超量彈藥的部分，依前述所建立完整之彈藥儲存可靠度資料庫，將儲存年限久且可靠度低(失效率高)的品項，因具高危安因素，可仿效美國公/私部門合作方式，檢討國內處理能量(國軍既有處理設施、民間專業處理廠商)，擬訂政策優先順序，分年分階段實施汰除銷燬；而儲存年限不久(例如：10年以內)但可靠度低(失效率高)的品項，表示品質不佳(可能與彈藥設計或生產技術有關)，具潛在危安因素，應列為不適用彈藥，併入階段性銷燬時程中；另，儲存年限久但失效率低(高可靠度)的品項，例如，儲存30年、可靠度仍維持95%以上，表示該品項品質穩定，仍具其原有效能，考量國防經費有限情形下，應優先轉作演訓或教育訓練使用。

四、鑒於國外研究有關庫儲彈藥爆炸事故之統計資料，顯示超量彈藥在銷燬處理前的存管安全不容輕忽。而彈藥儲存可靠度資料庫的資訊，可提供管理者警訊，任何可靠度低的品項，都表示

其物理或化學性質產生衰變，必須規劃妥適之儲運作法，將可能危害降至最低。

伍、結語

本文引介世界各國有關彈藥可靠度的研究文獻、美軍彈藥儲存可靠度方案，據以推導建構國軍傳統彈藥長期儲存可靠度之評估模式⁵¹，經模擬情境驗證試算，此模式合理可行；此外，本文探討各國超量彈藥的現況與處理情形，並藉可靠度觀點提出彈藥管理工作芻議。本文闡述之意旨，是希望藉由科學性的基礎研究論證以及參考國外的實務作法，提供國軍彈藥單位在未來募兵制體系下，如何以最有效率的方式執行國軍彈藥全壽期的管理工作，使能適質、適量支援三軍作戰任務。

作者簡介

林鵬舉上校，中正理工學院76年班，國防大學理工學院國防科學研究所應用化學組博士95年班，現任國防大學管理學院運籌管理學系專任助理教授。

51 此可靠度評估模式已提交行政院國科會103年度研究計畫審查，目前仍於審查階段作業中。